

ATLAS DU PERGÉLISOL ARCTIQUE

ATLAS DU
PERGÉLISOL
ARCTIQUE

Éditorial

L'Atlas du pergélisol, dont nous avons aujourd'hui le privilège de présenter la version française, est bien plus qu'un ouvrage scientifique. C'est un signal d'alarme, un repère indispensable pour comprendre l'une des composantes les plus vulnérables et stratégiques de la Cryosphère.

Fruit d'un travail rigoureux, porté par des chercheurs d'exception que je tiens ici à remercier chaleureusement, cet atlas éclaire avec précision l'état actuel du pergélisol et ses évolutions dramatiques sous l'effet du changement climatique.

À travers ses cartes, ses analyses et ses projections, cet atlas révèle l'ampleur d'un phénomène aux répercussions planétaires. Car la fonte du pergélisol libère des quantités massives de carbone, accélérant un cercle vicieux dont les conséquences ne s'arrêtent ni aux pôles, ni aux zones arctiques. C'est bien l'équilibre global de la planète qui est en jeu.

Face à cette réalité, l'urgence est absolue. Nous devons collectivement nous mobiliser. Chercheurs, institutions publiques, entreprises, citoyens : toutes et tous ont un rôle à jouer pour réparer le climat. Cela passe par un engagement accru en faveur du financement de la recherche scientifique. Une recherche qui, au-delà du constat, explore des solutions innovantes pour stabiliser et restaurer la Cryosphère, cet immense régulateur climatique.

L'histoire nous enseigne que l'humanité, lorsqu'elle s'unit autour des grandes causes, est capable de franchir l'impossible. Aujourd'hui, nous devons mettre notre génie collectif au service de la sauvegarde de la Cryosphère. Alors que l'ONU vient de proclamer la « décennie de la Cryosphère » le 13 août dernier, faisons de cet engagement une priorité planétaire.

Frederik Paulsen
Président de la Fondation Albédo pour la Cryosphère

FONDATION ALBÉDO POUR LA CRYOSPHÈRE
SOUS L'ÉGIDE DE LA FONDATION CNRS
WWW.ALBEDOCRYOSPHERE.FR

Clause de non-responsabilité
Les opinions et interprétations contenues dans cette publication sont celles de l'auteur ou des auteurs. Elles ne sont pas attribuables à GRID-Arendal ni à aucune des institutions auxquelles les contributeurs sont affiliés, et n'impliquent pas l'expression d'une opinion sur le statut juridique d'un pays, d'un territoire, d'une ville ou d'une zone d'autorité, ou sur la délimitation de frontières ou de limites, ni l'approbation d'un produit quelconque.

Copyright© 2023 GRID-Arendal

ISBN : 978-82-7701-222-3
DOI : https://doi.org/10.61523/KPJI4549

GRID-Arendal apprécierait de recevoir une copie ou un lien vers tout matériel utilisant cette publication ou ses graphiques comme source. Aucune des photos (Katie Orlinsky) ou des illustrations (Oluko) ne peut être reproduite. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite pour la revente ou à des fins commerciales sans l'autorisation écrite préalable de GRID-Arendal. Les demandes d'autorisation, accompagnées d'une déclaration indiquant le but et l'étendue de la reproduction, doivent être adressées conjointement à grid@grida.no et nunataryuk@awi.de.

Cette publication et ses cartes sont disponibles sous forme électronique à l'adresse suivante : www.grida.no/activities/404, www.awi.de et www.nunataryuk.org/news/atlas.

Citation recommandée :
Westerveld, L., Kurvits, T., Schoolmeester, T., Mulelid, O. B., Eckhoff, T. S., Overduin, P. P., Fritz, M., Lantuit, H., Alfthan, B., Sinisalo, A., Miesner, F., Viitanen, L.-K., et le consortium NUNATARYUK (2023). *Atlas du pergélisol arctique*. GRID-Arendal, Arendal.

GRID ARENDAL
A UNEP Partner

NUNATARYUK

L'Atlas du pergélisol arctique a été rédigé et édité par GRID-Arendal en collaboration avec tous les partenaires du projet NUNATARYUK, des scientifiques et des chercheurs en début de carrière

Ce projet est financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention n° 773421.

ATLAS DU
PERGÉLISOL
ARCTIQUE

Sommaire

Avant-propos 6
Prologue 7

Le congélateur de la Terre : Introduction au pergélisol 9
Sols gelés : Le pergélisol dans l'Arctique 11
Description du pergélisol : Caractéristiques du paysage 12
Éternellement gelé : L'histoire du pergélisol 15
Un équilibre glacial : Physiographie du pergélisol arctique 17
L'ennemi intérieur : Le carbone organique dans le pergélisol 19
Quand la glace s'épanche : Site canadien des Pingos 21
Forage en profondeur : Découvrir les secrets du pergélisol 22
Portrait : Annett Bartsch 25
Des implantations humaines instables: La vie sur un sol gelé 26
États gelés I : Fédération de Russie 29
Portrait : Vyacheslav Shadrin 31
États gelés II : Amérique du Nord 32
Portrait : Jessi Pascal 35
États gelés III : Région nordique 36
Portrait : Palle Jerimiassen 39

L'éveil du géant : Le pergélisol et le changement climatique 41
Réchauffement en hausse, refroidissement en baisse : Augmentation des températures du sol 42
Coup de chaud : Épaississement de la couche active 44
En voie de disparition : Diminution de l'étendue du pergélisol 47
Micro-organismes, macro-effets : Cycle du carbone dans le pergélisol 49
Plus vite, plus profond, plus fort I : Vitesse du dégel en Amérique du Nord 50
Plus vite, plus profond, plus fort II : Vitesse du dégel en Scandinavie et dans la Fédération de Russie 53
Franchir le seuil : Scénarios futurs d'émission de carbone 54
Portrait : Dmitry Streletskiy 57

Terrains en mouvement : Changements dans le pergélisol 59
Gel et flore : Le rôle de la végétation dans les paysages de pergélisol 61
Le feu sur la glace : Tourbe, pergélisol et feu 63
État de la matière : Eau, neige et pergélisol 64
Et au milieu coule une rivière : Rivières, deltas et hydrologie de l'Arctique 67
Aux confins du monde : La classification des côtes arctiques 68
L'usure du temps : L'érosion des côtes arctiques pergélisolées 70
Ronger le paysage : Le dégel rétrograde s'effondre 73
Portrait : Angus Alunik 75
Perdre du terrain : Taux projetés d'érosion côtière dans l'Arctique 76
Sous les vagues : Évolution du pergélisol sous-marin 79

Frissons arctiques : Impacts du pergélisol 81
Sentir la chaleur : Impacts du dégel du pergélisol sur les infrastructures 82
Une activité à risque I : Arctique nord-américain et Kalaallit Nunaat (Groenland) 84
Une activité à risque II : La Fédération de Russie et l'Arctique scandinave 87
Terre instable I : Infrastructures côtières en Iamalo-Nénètsie 89
Portrait : Susanna Gartler 91
Terre instable II : Renforcement des pistes d'atterrissage à Paulatuk 92
Terre instable III : Garder les aliments froids en Alaska 94
Terre instable IV : Aménagement urbain à Ilulissat 97
Isolement pernicieux : Santé, bien-être et pergélisol 98
Portrait : Gwen Healey Akearok 101
Terrains toxiques : Contaminants et santé environnementale 102
Revenir à la vie : Pathogènes ré-émergents 104
Actifs gelés I : L'économie formelle 107
Actifs gelés II : Activités traditionnelles et de subsistance 109
Patrie culturelle : Paysages d'Alass en Iakoutie 110

Tenir bon : Adaptation au dégel du pergélisol 113
Une route semée d'embûches : Infrastructures de transport et pergélisol 114
En terrain miné : Infrastructures minières et pergélisol 117
Garder la lumière allumée : Infrastructures énergétiques et pergélisol 118
Pas de temps à perdre : Gestion des déchets et pergélisol 120
Histoire moderne : Préserver le patrimoine culturel du Svalbard 123
Portrait : Ingrid Rekkavik 125

Vers le sud : Le pergélisol dans d'autres régions 127
Une perspective planétaire : Le pergélisol en dehors de l'Arctique 129
Géants de glace : Le pergélisol dans les montagnes 130
La vue du sommet : Le plateau Qinghai-Tibétain, l'Himalaya Hindu Kush et les Andes 132
Le cœur gelé de l'Europe : Le pergélisol dans les Alpes 134
Les extrémités de la Terre I : Le pergélisol en Antarctique 136
Les extrémités de la Terre II : Péninsule Antarctique 138
Les extrémités de la Terre III : Terre de la Reine Maud, terre de Victoria et vallées sèches de McMurdo 140

Au-delà de l'horizon 143

Glossaire 146
Acronymes 147
Références (du document original) 148
Auteurs et remerciements 166
Pleins feux sur les artistes : Olga Borjon-Privé (Oluko) 168
Pleins feux sur les artistes : Katie Orlinsky 170

Avant-propos

Le mot « atlas » a été inventé par le célèbre géographe et cartographe flamand Gérard Mercator. En 1595, il publie une série de cartes entremêlées de textes et d'épitaphes, à la manière d'un atlas moderne. Considérant que cet effort global était plus qu'une simple collection de cartes, il nomma judicieusement son ouvrage Atlas, ou Méditations cosmographiques sur la création de l'univers. Sans être aussi grandiose, notre projet d'Atlas du pergélisol arctique découle directement de la vision de Mercator : s'agit d'utiliser des cartes et des textes pour donner au lecteur une vision holistique de la Terre.

Les cartes sont des instruments puissants qui permettent de transmettre des informations pertinentes à la société d'une manière agréable à l'œil. Là où les mots ne suffisent pas, les cartes apportent un niveau de compréhension supplémentaire. D'autre part, les mots et les histoires peuvent apporter une profondeur et un contexte émotionnel que les cartes ne peuvent pas représenter. Dans cet atlas, nous nous sommes efforcés de fournir des cartes et des graphiques de la plus haute qualité, associés à des textes, des illustrations et des récits pour expliquer certains des processus complexes associés au pergélisol. Nous avons cherché à évoquer les expériences des personnes vivant sur le pergélisol et effectuant des recherches dans ce domaine. Les 82 cartes et graphiques, plus de 50 000 mots et neuf articles ne peuvent rendre entièrement justice à la richesse et à la complexité du « pays du pergélisol »– expression forgée par Edward A.G. Schuur et ses collègues en 2022, mais ensemble, ils constituent un effort sans précédent pour saisir l'essence des caractéristiques du pergélisol et les enjeux pour les politiques locales, régionales et mondiales dans un seul et même document. Ceci a été rendu possible grâce à l'implication des chercheurs et des partenaires du consortium, ainsi qu'aux résultats du projet Horizon 2020 de l'Union européenne NUNATARYUK (2017-2023).

En effet, cet atlas arrive à un moment où le mot « pergélisol » est passé d'un sujet académique relativement peu connu à un sujet référencé dans les médias et discuté par le public du monde entier. Les gens ont connaissance du terme ou en ont entendu parler quelque part. Au cours des 20 dernières années, le nombre de recherches sur le web pour le terme « pergélisol » a presque doublé par rapport au volume global de requêtes pour ce terme. Cet intérêt croissant s'explique en partie par l'importance du pergélisol pour la politique climatique mondiale et l'adaptation des communautés locales. Les scénarios climatiques montrent que le dégel du pergélisol émettra entre 50 et 200 milliards de tonnes d'équivalents de dioxyde de carbone d'ici la fin du siècle. Les coûts d'adaptation des communautés établies sur le pergélisol pourraient monter en flèche et atteindre 182 milliards de dollars américains d'ici le milieu du siècle. L'Union européenne a fait du pergélisol l'un des huit domaines d'intervention de sa politique arctique publiée en 2021, soulignant ainsi l'urgence de s'attaquer à ce problème, tant du point de vue de la recherche que de la politique.

Cet atlas tente de synthétiser et de diffuser les connaissances existantes sur le pergélisol. C'est un ouvrage qui arrive à point nommé, porté par l'enthousiasme engagé de ses auteurs et de ses collaborateurs. Près d'une centaine de personnes ont participé à sa réalisation et il décrit magnifiquement le pergélisol à l'aide de cartes, de textes, d'œuvres d'art et d'histoires. Loin d'être un produit académique au sens traditionnel du terme, il rassemble des connaissances issues des voix des scientifiques, des peuples autochtones, des habitants du Nord et des opérateurs locaux afin de fournir une vision holistique et inclusive des défis actuels qui se posent au « pays du pergélisol ».



Hugues Lantuit
Chef du groupe de recherche sur le littoral arctique
Institut Alfred Wegener



Dr. Peter Harris
Directeur général
GRID-Arendal

Prologue

La cryosphère est la partie de la Terre qui est gelée en permanence. La neige, la glace, les glaciers, les calottes glaciaires et les calottes glaciaires font tous partie de la cryosphère, tout comme le pergélisol. Tous les composants de la cryosphère contribuent au système de refroidissement de la Terre et en sont la preuve. Sentinelle sensible, la cryosphère réagit aux fluctuations de température. Cependant, alors que les activités humaines réchauffent la Terre à un rythme sans précédent, ce système de refroidissement ne peut plus faire face et s'effondre.

L'évolution de la neige et de la glace sur terre, des glaciers, des calottes glaciaires et de la glace de mer est évidente depuis longtemps car elle est facilement observable et mesurable. La glace de mer réfléchissante de l'océan Arctique est remplacée par des eaux libres, tandis que la fonte des glaces terrestres – « les châteaux d'eau » de la Terre – accélère l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale. Les effets sur le pergélisol sont toutefois moins visibles et ont reçu moins d'attention en dehors de la communauté scientifique et des habitants de l'Arctique. Néanmoins, le pergélisol subit des changements rapides qui entraînent des répercussions sur l'ensemble de la planète.

Situé sous la surface de la terre et de l'océan, le pergélisol est rarement visible. Pourtant, sa taille est comparable à celle d'autres composants de la cryosphère, rivalisant avec l'Antarctique en termes d'étendue spatiale. Comme d'autres parties de la cryosphère, le pergélisol absorbe de la chaleur. Le volume global de glace qui fond actuellement dans le pergélisol est similaire à la quantité de glace perdue chaque année en Antarctique : environ 150 milliards de tonnes d'eau par an. Cela représente suffisamment d'eau pour augmenter le niveau de la mer d'environ 0,4 millimètres. La mesure dans laquelle cette eau atteint l'océan est incertaine, mais le dégel du pergélisol signifie que la surface terrestre dans de nombreuses régions de pergélisol riches en glace « s'abaisse » beaucoup plus vite que la mer ne monte, ce qui pose des problèmes aux communautés de l'Arctique et de la côte arctique. Ce qui distingue véritablement le pergélisol des autres composantes de la cryosphère n'est pas tant sa teneur en eau que la quantité de carbone qu'il contient. Les restes gelés de plantes et d'animaux dans le pergélisol en font depuis longtemps une réserve de carbone importante pour des centaines de milliers, voire des millions d'années. C'est notre congélateur naturel à l'échelle planétaire. Mais à mesure que le pergélisol dégèle, cette matière organique entre en décomposition, ce qui entraîne la production et l'émission de gaz à effet de serre. Compte tenu de la taille de l'écosystème de pergélisol et de la grande quantité de carbone organique qu'il contient, les implications pour le réchauffement climatique sont considérables.

Le dernier rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) souligne clairement l'importance du pergélisol pour le climat de la Terre. Alors que le dégel du pergélisol s'accélère avec le réchauffement climatique, sa superficie et son volume continuent de diminuer, entraînant des changements importants et irréversibles dans les écosystèmes arctiques. La flore et la faune, ainsi que la vie, les moyens de subsistance et les identités culturelles des peuples de l'Arctique s'en trouvent menacés. Le rapport souligne également que la libération continue de gaz à effet de serre due au dégel du pergélisol contribuera au changement climatique, aggravant le réchauffement actuel et pour les siècles à venir, et augmentant de fait les défis auxquels nous sommes confrontés en tant que société – une société mondialisée.

Ce qui est certain, c'est qu'au cours des 50 dernières années, le changement s'est accéléré dans l'Arctique. Cette région s'est réchauffée à un rythme presque quatre fois supérieur à la moyenne mondiale en raison d'une combinaison de rétroactions climatiques, un processus connu sous le nom d'amplification arctique. Au cours de la même période, le pergélisol s'est réchauffé de 2 à 3 °C. Si le réchauffement climatique se poursuit, l'Arctique connaîtra un réchauffement et un dégel du pergélisol accrus.

La compréhension du rôle du pergélisol dans le système climatique et des divers aspects liés à son dégel fait l'objet d'une attention croissante, tant dans le domaine des sciences naturelles que dans celui des sciences sociales. L'objectif principal de l'Atlas du pergélisol arctique est de consolider ces découvertes récentes et d'offrir un état des lieux du pergélisol. Il s'agit de mieux comprendre le rôle et les impacts du dégel du pergélisol et de partager les connaissances afin d'atténuer les incertitudes et de faciliter l'adaptation variations climatiques, notamment en ce qui concerne les infrastructures, la sécurité alimentaire et la mobilité. Cet Atlas s'efforce d'être à la fois informatif et motivant, en contribuant à une meilleure compréhension de cette composante largement invisible mais d'une importance vitale pour l'écosystème de la Terre.

L'Atlas du pergélisol arctique s'efforce également d'évaluer l'impact du changement du pergélisol sur les peuples autochtones de l'Arctique. Si les habitants de l'Arctique ont adopté un mode de vie plus moderne, les peuples autochtones continuent à entretenir des liens étroits avec la terre afin de préserver leur culture, leurs connaissances et leur approvisionnement en nourriture traditionnelle. Cependant, les conséquences dramatiques de la fonte du pergélisol sur les écosystèmes arctiques mettent en péril des traditions culturelles vieilles de plusieurs milliers d'années.

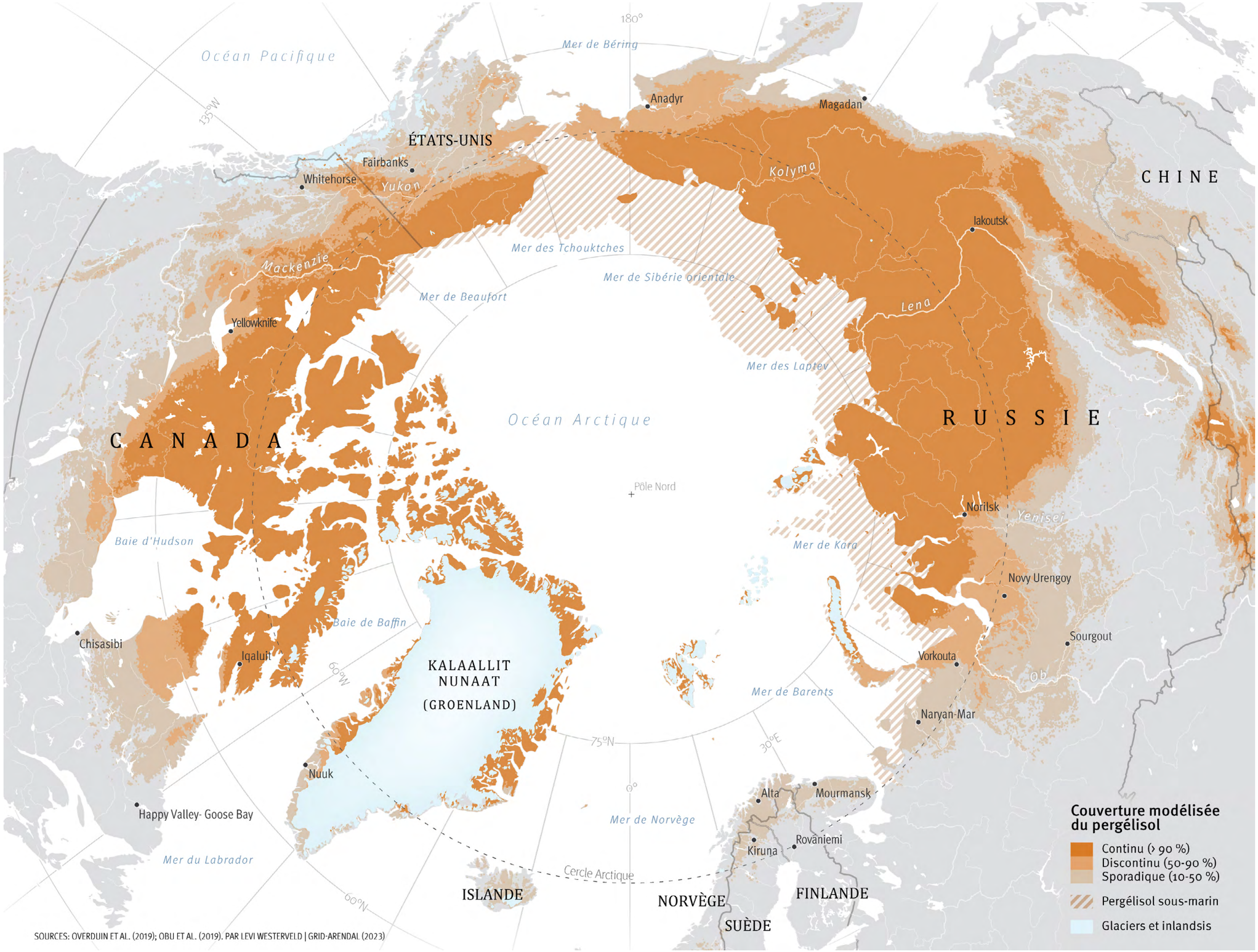
Enfin, il n'existe pas de définition unique de l'Arctique. Cette vaste région concentre de grandes différences sociales, culturelles, physiques, écologiques et économiques. Le changement du pergélisol lui-même est très diversifié et spécifique à chaque endroit. Dans cet atlas, les nombreuses dimensions du changement du pergélisol sont abordées pour l'hémisphère nord sans adhérer à une définition stricte de l'Arctique ni l'associer uniquement à la présence du pergélisol car, à mesure que le climat se réchauffe et que le pergélisol dégèle, l'Arctique tel que nous le connaissons aujourd'hui diminuera également.



© Katie Orlinsky

Le congélateur naturel de la Terre

Introduction au pergélisol



SOURCES: OVERDUIN ET AL. (2019); OBU ET AL. (2019). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Sols gelés

Le pergélisol dans l'Arctique

Le pergélisol est un sol qui reste gelé pendant au moins deux ans, présent dans les régions les plus froides de la planète : les zones arctique et boréale, l'Antarctique et les régions de haute altitude. Cette caractéristique de ce paysage vaste mais largement invisible influence non seulement la flore et la faune de ces régions, mais aussi la vie, les moyens de subsistance et les cultures des personnes qui y vivent et y travaillent.

Déjà connu en Russie médiévale, le phénomène du sol gelé « en permanence » n'a été décrit scientifiquement qu'en 1757 par le scientifique russe Mikhael Lomonosov. Les premières cartes délimitant l'étendue du « gel permanent » sont apparues à la fin des années 1880 pour la Sibérie, puis en 1928 pour l'ensemble de l'Arctique. Les termes « gel permanent » ont finalement été remplacés par « sol gelé en permanence ». Aujourd'hui, la définition acceptée du pergélisol est la suivante : « le sol (le sol proprement dit ou la roche, y compris la glace et la matière organique) dont la température reste égale ou inférieure à 0 °C pendant au moins deux années consécutives ».

À l'échelle mondiale, le pergélisol couvre entre 14 et 16 millions de kilomètres carrés de la surface terrestre exposée, soit à peu près la superficie de l'Antarctique. La majeure partie du pergélisol se trouve dans l'hémisphère nord, où il recouvre environ 15 % de la surface terrestre exposée. On le trouve pratiquement partout dans l'Arctique. Les plus grandes étendues de pergélisol se trouvent en Alaska, au Canada, au Kalaallit Nunaat (Groenland), en Russie et sur le plateau tibétain. De plus petites zones de pergélisol se trouvent en Islande, en Scandinavie, au Svalbard et dans les régions de haute montagne en Europe. Dans l'hémisphère sud, le pergélisol se trouve dans les Andes et en Antarctique. Pour le pergélisol terrestre, les scientifiques distinguent quatre zones de pergélisol en fonction de la proportion du sol qui demeure gelée en permanence : continue, discontinue, sporadique et isolée.

Dans la zone continue, 90 % ou plus du paysage repose sur du pergélisol. Celui-ci s'étend sous la plupart des surfaces, à l'exception des rivières et des plans d'eau profonds, et peut atteindre plusieurs centaines de mètres de profondeur.

Dans la zone discontinue, le pergélisol est présent sous 50 à 90 % du paysage. Comme son nom l'indique, cette zone est fragmentée en secteurs avec et sans pergélisol, le pergélisol étant absent sous les pentes orientées vers le sud. La transition entre le pergélisol continu et discontinu correspond généralement à la transition de la toundra à la végétation boréale subarctique, bien qu'il n'existe pas de frontière nette entre ces deux zones. Dans la zone de pergélisol discontinu, la température moyenne annuelle du sol est généralement supérieure à -2 °C. L'épaisseur du pergélisol varie beaucoup plus dans la zone discontinue, allant de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres.

Près de l'extrémité méridionale de la zone discontinue, le pergélisol est présent sous forme de zones sporadiques et isolées, se trouvant respectivement sous 10 à 50 % et moins de 10 % de ces étendues. Ce pergélisol est réparti de manières irreguliere, apparaissant généralement sous les pentes orientées vers le nord et dans les tourbières, où les zones exemptes de pergélisol sont courantes.

L'épaisseur du pergélisol varie de quelques mètres à plus de cent mètres. En Finlande, en Suède et en Norvège continentale, le pergélisol est principalement discontinu ou sporadique.

De vastes étendues de pergélisol existent également sous le fond marin. Le pergélisol sous-marin est présent sur les plateaux continentaux de l'Arctique sur une vaste surface au large de la côte russe, de la mer de Barents à la mer des Tchouktches et au-delà, jusqu'aux plateaux continentaux de l'Alaska et du nord-ouest du Canada. L'étendue de ce pergélisol sous-marin est estimée à 2,5 millions de kilomètres carrés.

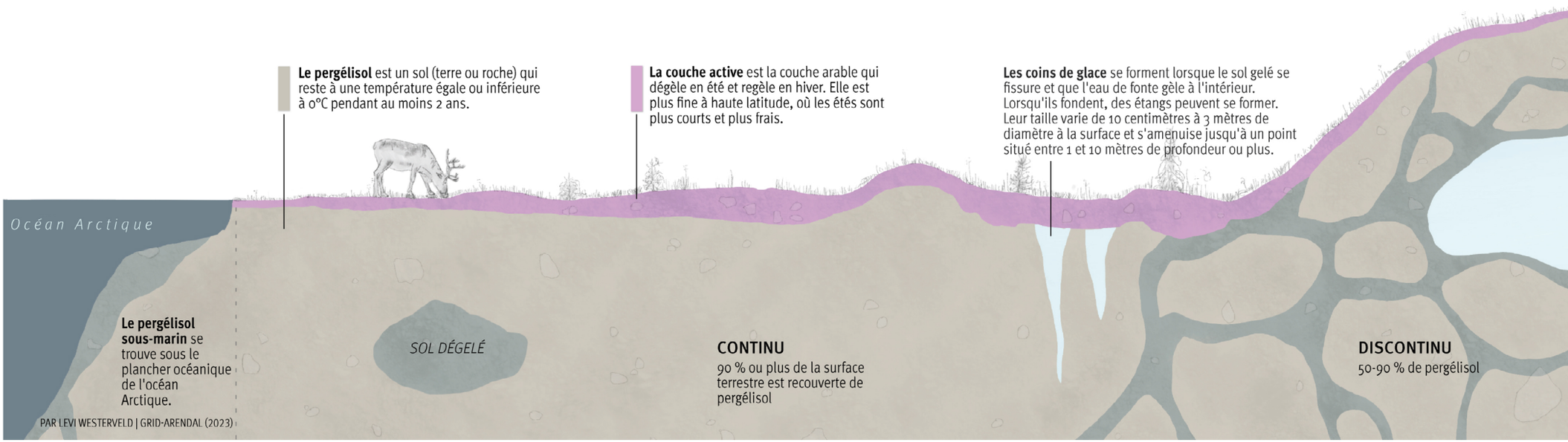
Les plus grandes superficies, plus de 60 % de ce type de pergélisol, se trouvent dans les mers de Kara, de Laptev, de Sibérie orientale et des Tchouktches. Dans ces mers, l'épaisseur moyenne du pergélisol peut dépasser 400 mètres sous le plancher océanique.

Profil du pergélisol

Caractéristiques du paysage

Les environnements pergélisolés sont associés à de nombreuses caractéristiques paysagères uniques et des processus géomorphologiques. Le sol au-dessus du pergélisol, soumis au gel et au dégel annuels, est appelé la couche active. Cette couche joue un rôle important dans les écosystèmes arctiques, car c'est là que se déroulent la majorité des processus hydrologiques, biogéochimiques et pédologiques. L'épaisseur de la couche active dépend principalement du réchauffement estival du sol ainsi que de ses propriétés. En général, on observe des couches actives plus épaisses ou plus profondes dans les régions où les étés sont plus chauds, bien que les conditions locales telles que la végétation, la durée, l'épaisseur de la couverture neigeuse, ainsi que l'humidité du sol, aient également une influence. Dans le Haut-Arctique, où les étés sont frais et courts, la couche active peut n'avoir que quelques centimètres d'épaisseur. Là où les étés sont plus chauds, l'épaisseur de la couche active peut atteindre un mètre ou plus. Dans les paysages riches en tourbe, la couche active peut être très fine car la tourbe isole le pergélisol durant l'été. L'évolution de l'épaisseur de la couche active est l'une des caractéristiques du réchauffement climatique dans l'Arctique et fait donc l'objet d'une surveillance scientifique.

Les coins de glace sont fréquents dans les paysages de pergélisol, principalement sous la forme de réseaux polygonaux à la surface du paysage. Leur taille varie de quelques centimètres à 3 mètres de large à la surface et s'effilent jusqu'à un point situé entre 1 et 10 mètres de profondeur ou plus. Les coins de glace se forment lorsque des fissures verticales s'ouvrent dans le sol lors d'un refroidissement hivernale rapide (provoquant une contraction du sol), puis, ensuite, se remplissent d'eau de fonte au printemps. En regelant, l'eau crée une veine de glace verticale dans le sol et devient une zone de faiblesse naturelle où se forment de nouvelles fissures au cours des hivers suivants. Comme seule la couche active située au-dessus du pergélisol dégèle, la forme en coin est maintenue pendant l'été. Ce processus pouvant se répéter chaque année, le coin de glace s'élargit progressivement, repoussant le sol alentours pour créer des crêtes. Lorsque les matériaux du sol se contractent sous l'effet dd'un gel rapide, la contrainte est finalement soulagée par la formation de fissures de gel qui s'entrecroisent en forme de polygones, créant ainsi des polygones à coins de glace. D'un diamètre pouvant mesurer quelques mètres à 50 mètres de large, ces polygones peuvent contenir un étang et sont plus fréquents dans la zone de pergélisol continu. Ils jouent un rôle dans le contrôle du microclimat, du mouvement de l'eau et du flux de gaz à effet de serre provenant du pergélisol. Lorsque les coins de glace fondent, ils peuvent former des réseaux de tranchées ou de ravines entre lesquels se trouvent des monticules de sédiments restants pouvant atteindre plusieurs mètres de hauteur. Ces monticules abritent plusieurs espèces animales, car



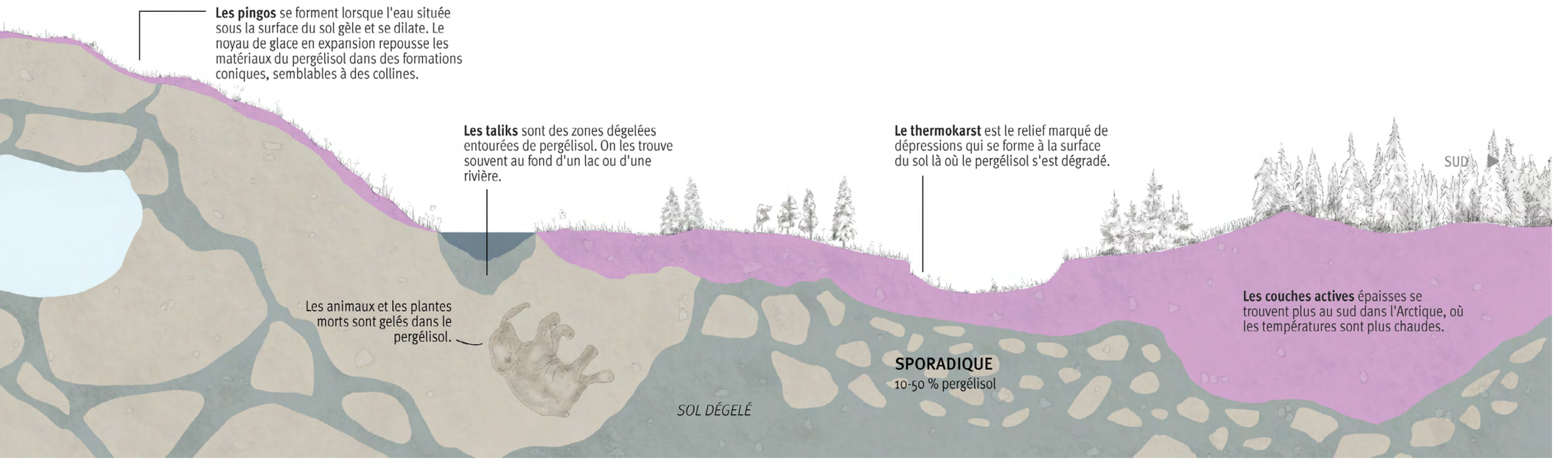
ils constituent un habitat unique, plus chaud et plus sec que la zone environnante.

Les pingos sont de grandes collines coniques constituées d'un noyau de glace massif recouvert de terre et de végétation. Ils se forment lorsque de l'eau est injectée dans le pergélisol ou lorsqu'un talik regèle sous un ancien lac, entraînant la formation d'un noyau de glace qui pousse le sol sus-jacent vers le haut. Présents dans les zones de pergélisol continu et discontinu, les pingos mesurent de 3 à plus de 50 mètres de hauteur et peuvent atteindre 1 000 mètres de diamètre. Leur base est circulaire ou ovale, et leur sommet fissuré peut également contenir un cratère.

On trouve des structures analogues aux pingos au large, dans certaines zones du plateau continental de l'océan Arctique. Superficiellement semblables aux pingos terrestres, elles mesurent généralement moins de 30 mètres de haut et 300 mètres de diamètre. La formation de pingos en mer est liée à l'écoulement de liquides et de gaz provoqué par le dégel du pergélisol ou à la décomposition de gaz résultant d'une transgression marine sur un paysage de pergélisol. Les taliks sont des zones de sol non gelé à l'intérieur du pergélisol. Même en hiver, ces matériaux ne gèlent pas. Cela peut être dû à des anomalies thermiques locales, telles que le stockage de chaleur dans les eaux de surface (rivières, lacs, etc.), qui empêche les matériaux sous-jacents de geler, ou la circulation d'eaux souterraines minéralisées à travers le pergélisol. Dans la zone de pergélisol continu, on trouve souvent des taliks sous des lacs et des rivières thermokarstiques qui ne gèlent pas jusqu'au fond.

Le thermokarst est un processus d'érosion par lequel le dégel du pergélisol entraîne l'affaissement, l'effondrement ou le glissement du sol lorsque la glace excédentaire, comme les coins de glace, fond. Environ 3,6 millions de kilomètres carrés, soit 20 % de la région nord du pergélisol, sont recouverts de paysages thermokarstiques.

De nombreuses formes de relief sont associées aux régions thermokarstiques. Les lacs et étangs thermokarstiques, largement répandus dans le paysage arctique, se forment dans des dépressions créées par le dégel du pergélisol riche en glace. Il s'agit d'écosystèmes importants, offrant un habitat précieux à de nombreuses espèces arctiques. À mesure que le dégel du pergélisol sous-jacent continue, ces lacs peuvent se vider et disparaître, dans le cadre du cycle des lacs de dégel. Parmi les autres formes de relief thermokarstiques typiques, on peut citer les effondrements rétrogressifs liés au dégel, les ravines d'érosion et les coulées de la couche active. Ces phénomènes apparaissent en terrain vallonné, lorsque l'érosion atteint du pergélisol riche en glace, provoquant le recul d'un versant, ou lorsque des sols saturés en eau s'écoulent vers le bas de la pente.





SOURCES: EHLERS (2011); LINDGREN ET AL. (2015); OVERDUIN ET AL. (2019); OBU ET AL. (2019). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Éternellement gelé

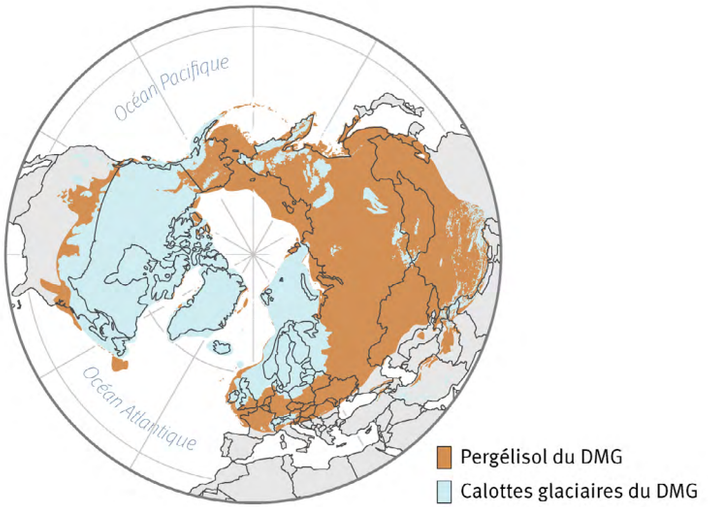
L'histoire du pergélisol

Pour comprendre le pergélisol moderne, il faut connaître les conditions dans lesquelles il s'est formé et comment elles ont changé. Bien que le pergélisol le plus ancien de la Terre se soit probablement formé il y a 2,4 millions d'années, la plupart des pergélisols que l'on trouve aujourd'hui se sont formés pendant ou depuis la dernière période glaciaire, qui s'est achevée il y a environ 12 000 ans. Depuis lors, le climat de la Terre a alterné entre des périodes glaciaires froides et des périodes interglaciaires plus chaudes, ce qui a eu une incidence sur la présence, la répartition et l'épaisseur du pergélisol.

Le dernier maximum glaciaire (DMG), période où les calottes glaciaires étaient les plus étendues dans le passé géologique le plus récent, s'est produit il y a environ 23 000 à 19 000 ans dans l'hémisphère nord. À cette époque, le niveau de la mer était inférieur d'environ 125 mètres au niveau actuel et les calottes glaciaires couvraient environ 32 % de la surface totale de la Terre (contre 10 % aujourd'hui). Le pergélisol a probablement atteint son amplitude maximale (le dernier maximum de pergélisol) dans l'hémisphère nord vers la fin de la dernière période glaciaire.

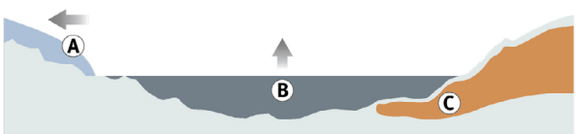
Le pergélisol sous-marin s'est formé pendant les périodes de glaciation, lorsque le niveau de la mer était beaucoup plus bas. Dans la région de la Béringie au cours du DMG, par exemple, le niveau inférieur de la mer a exposé de vastes zones du plateau continental, formant un pont terrestre entre l'Amérique du Nord et l'Asie. Le climat très froid a créé un pergélisol profond et froid sous les terres exposées. Avec l'arrivée de conditions plus chaudes, les calottes glaciaires ont reculé et le niveau de la mer est remonté, submergeant ce pont terrestre. Les eaux froides du fond des plateaux arctiques et la glace dans les sédiments ont permis à ce pergélisol de persister pendant plus de 10 000 ans après avoir été submergé. Sous l'effet du réchauffement de l'eau de mer en surface et du flux de chaleur géothermique en profondeur, le pergélisol sous-marin dégèle lentement depuis qu'il a été inondé.

L'ajustement isostatique glaciaire (AIG) joue un rôle essentiel dans la détermination du taux de variation du niveau local de la mer et de la présence ou de l'absence de pergélisol sous-marin et salin. L'ajustement isostatique glaciaire correspond au rebond de la croûte terrestre après le retrait de grandes calottes glaciaires. Les terres qui étaient couvertes par de grandes calottes glaciaires à la fin de la dernière période glaciaire (par exemple, une grande partie de la Scandinavie et l'archipel arctique canadien) émergent aujourd'hui. Le pergélisol sous-marin est absent de ces régions. En revanche, là où la terre était libre de glace (par exemple, de larges étendues de la plaine côtière arctique dans l'ouest de l'Amérique du Nord et de l'Eurasie), de vastes zones de pergélisol terrestre ont été créées, puis inondées par la mer, ce qui a conduit à l'apparition d'un pergélisol sous-marin. En outre, l'influence de l'AIG sur l'hydrologie, la température et la topographie peut modifier l'accumulation et la répartition du sel, ainsi que la formation de sols gelés, ce qui entraîne l'apparition d'un pergélisol salin.





Dernier Maximum Glaciaire (DMG). Les calottes glaciaires et les glaciers couvrent de grandes parties de l'hémisphère nord, en particulier en Amérique du Nord et en Scandinavie. Le pergélisol est présent dans d'autres régions, notamment en Asie.



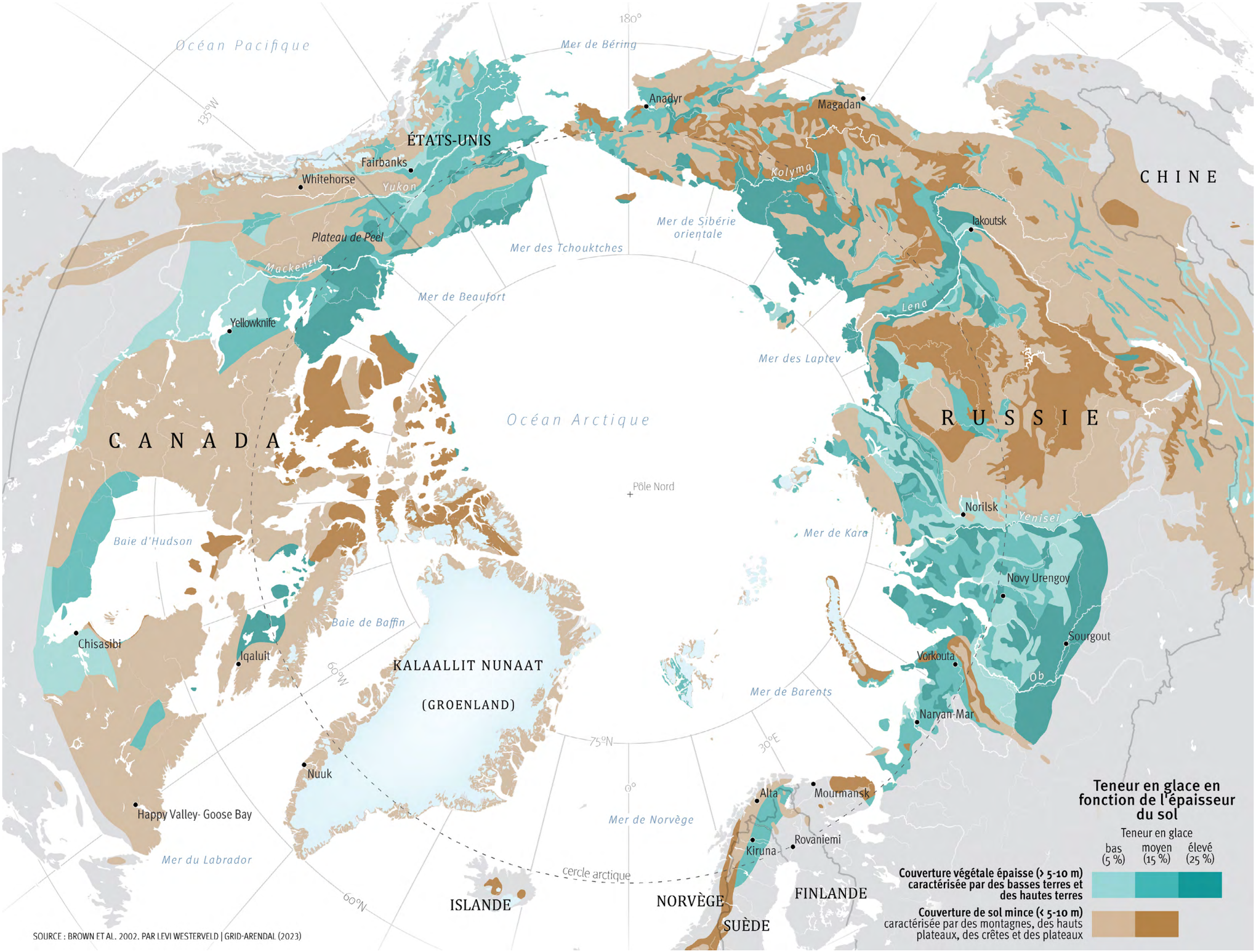
Avec l'augmentation des températures, les calottes glaciaires et les glaciers reculent (A), ce qui entraîne une élévation du niveau de la mer (B). La montée des eaux inonde le pergélisol terrestre et crée le pergélisol de la mer du Sud (C).



Aujourd'hui. Les calottes glaciaires et les glaciers continuent de fondre. Le changement climatique entraîne la dégradation et le dégel du pergélisol terrestre, côtier et sous-marin (D).



SOURCE : JOUZEL ET AL. (2007). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



SOURCE : BROWN ET AL. 2002. PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Un équilibre glaciaire

Physiographie du pergélisol arctique

La façon dont le pergélisol réagit au réchauffement atmosphérique dépend de nombreux facteurs, notamment des propriétés locales du sol, de la topographie, de l'hydrologie et de la teneur en glace de sol. Une couche superficielle sèche et riche en matière organique isole le sol et peut retarder le dégel, en particulier si le pergélisol est riche en glace de sol. En revanche, la roche mère est un bien meilleur conducteur de chaleur, de sorte que le pergélisol des zones rocheuses réagit beaucoup plus rapidement au réchauffement.

Les caractéristiques du paysage, telles que les collines et les vallées, ont une incidence sur la température des sols et donc les processus de pergélisol. La température d'un terrain en pente dépend de son inclinaison et de son aspect (orientation vers le soleil). Dans l'hémisphère nord, les pentes raides orientées vers le sud absorbent plus de chaleur que les pentes douces ou les pentes orientées vers le nord. De même, du côté de l'ubac, la neige peut rester plus longtemps que dans les endroits exposés. La neige agit comme un isolant, maintenant la température du sol au lieu de le refroidir. Les paysages de plaines sédimentaires sont plus propices à la formation de lacs thermokarstiques, tandis que les zones au relief plus prononcé sont plus sensibles à l'affaissement et à l'érosion.

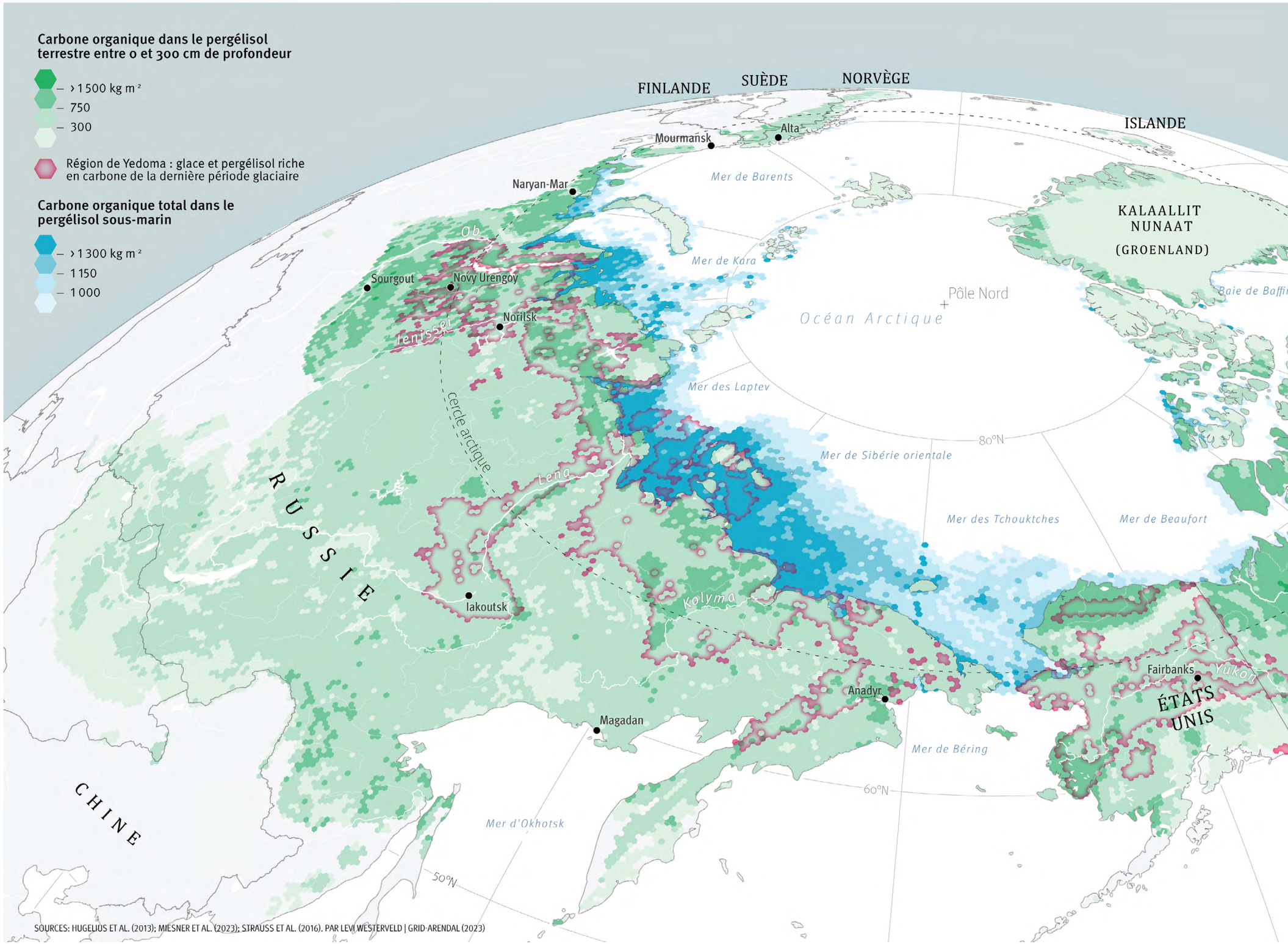
La glace de sol désigne la glace qui se forme dans les sols gelés et congelés. La teneur en glace souterraine a une influence considérable sur le dégel du pergélisol, avec des différences notables entre un pergélisol riche en glace (c'est-à-dire un pergélisol contenant de grandes quantités de glace) et un pergélisol pauvre en glace (c'est-à-dire un pergélisol à teneur faible ou nulle en glace). La fonte de l'excès de glace souterraine entraîne un affaissement de la surface et la formation d'étangs et de lacs, un processus connu sous le nom de thermokarst. Dans un pergélisol riche en glace, l'augmentation du taux de développement du thermokarst peut avoir un impact sur l'hydrologie, l'écologie et la biogéochimie, ainsi que sur les infrastructures telles que les bâtiments et les voies de transport, alors que dans les zones où la glace est moins abondante, les effets seront moindres.

Avec le réchauffement du climat arctique et le dégel du pergélisol, le paysage peut subir de grands changements, en particulier dans les zones où le pergélisol est riche en glace. Lorsque le pergélisol riche en glace dégèle, les flancs des collines peuvent s'effondrer, ce qui entraîne des « effondrements rétrogressifs dus au dégel ». Les sédiments dégelés sont saturés d'eau de fonte et commencent à dévaler les pentes, où ils peuvent menacer les infrastructures. S'ils pénètrent dans les masses d'eau avoisinantes, l'augmentation des sédiments peut rendre l'eau plus trouble et affecter les écosystèmes aquatiques. Si un affaissement dû au dégel atteint le bord d'un lac, celui-ci peut s'assécher rapidement lorsque l'eau s'écoule par-dessus l'effondrement du mur de tête.

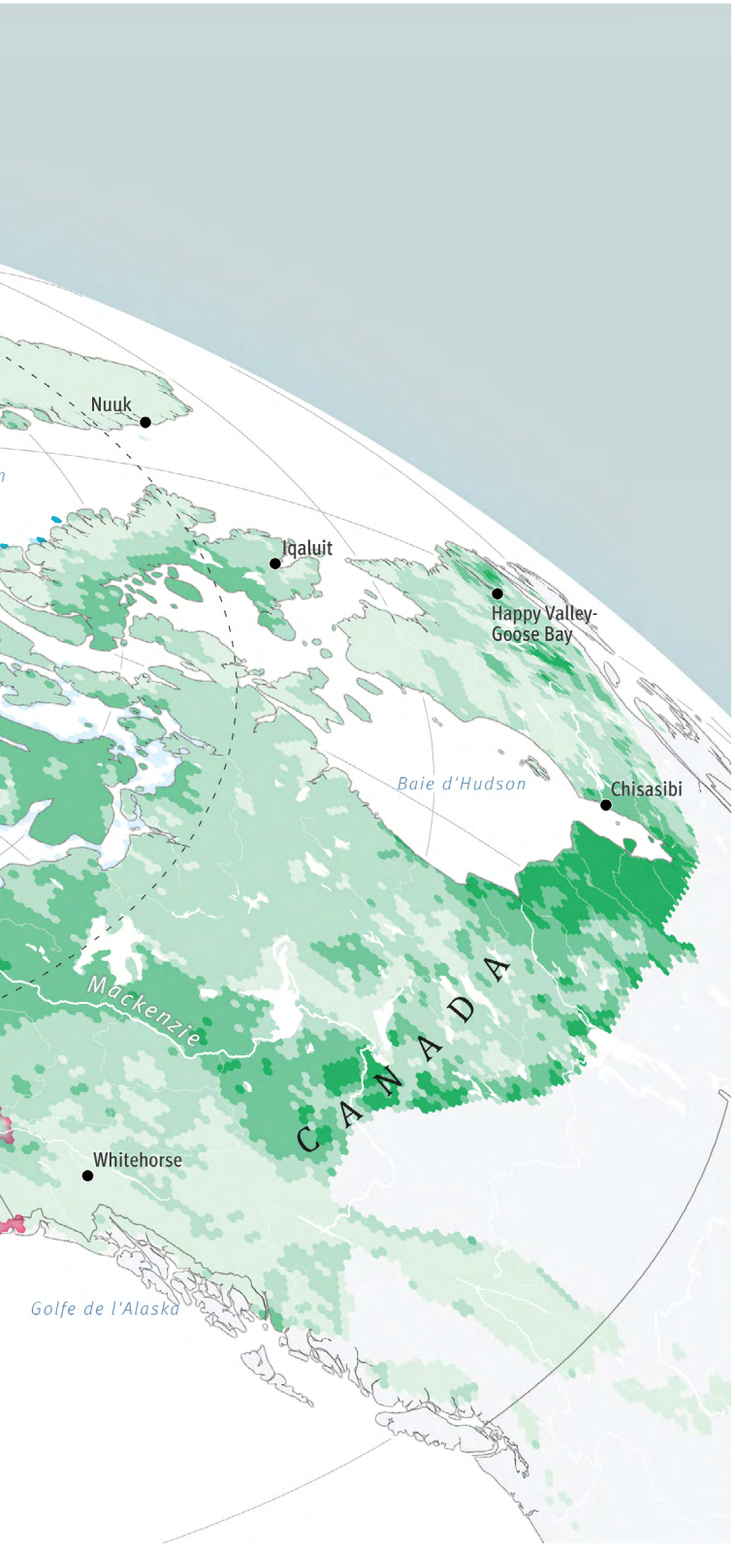
Le plateau de Peel, dans les Territoires du Nord-Ouest du Canada, est peut-être en train de connaître certains des changements les plus spectaculaires d'Amérique du Nord. Un paysage accidenté avec de nombreux cours d'eau rapides, combiné à un pergélisol riche en glace, entraîne des modifications à grande échelle du paysage à mesure que la glace de sol fond et que les précipitations estivales augmentent. Les sédiments riches en glace de la partie supérieure du pergélisol étant exposés au dégel, le sol s'affaisse, exposant davantage de pergélisol au réchauffement et libérant des sédiments dans les cours d'eau avoisinants, qui finissent par atteindre l'océan Arctique. Ces processus se produisent dans tout l'Arctique, partout où il y a du pergélisol riche en glace.

Bien que l'apparition et la disparition de lacs thermokarstiques ne soient pas rares, la tendance générale est à la diminution de leur nombre. Les lacs thermokarstiques peuvent s'assécher en raison de la présence de taliks, des zones de sol non gelé dans le pergélisol qui sont reliées aux eaux souterraines sous-jacentes, ou en raison de l'érosion des canaux de drainage. Avec le réchauffement de l'Arctique, les lacs thermokarstiques et les lacs peu profonds sans origine thermokarstique pourraient devenir plus fréquents dans la zone de pergélisol continu, tandis qu'ils pourraient disparaître dans la zone discontinue et dans les plaines côtières riches en lacs.

Certains paysages de pergélisol se caractérisent également par des polygones de coins de glace, qui se forment lorsque le sol gelé se rétrécit et se fissure. Ces fissures se produisent selon un schéma polygonal et les coins de glace qui en résultent se développent pour former un motif en nid d'abeille à travers la toundra. Au fur et à mesure que le climat se réchauffe, les coins de glace peuvent fondre et les centres des polygones peuvent se vider de leur eau. Avec le temps, cela peut entraîner un assèchement du paysage et un affaissement du sol. Dans les zones côtières de faible altitude, les polygones de glace seront inondés par l'élévation du niveau de la mer ou par la montée des eaux des rivières.



SOURCES: HUGELIUS ET AL. (2013); MIESNER ET AL. (2023); STRAUSS ET AL. (2016). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



L'ennemi intérieur

Le carbone organique dans le pergélisol

Tant que le pergélisol reste gelé, le carbone organique qu'il contient reste enfermé dans le sol. Mais lorsque le pergélisol dégèle, les micro-organismes deviennent actifs et commencent à décomposer la matière organique en libérant des gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux. Le méthane et l'oxyde nitreux sont des gaz à effet de serre à durée de vie relativement courte mais très puissants, tandis que le dioxyde de carbone est beaucoup plus abondant et peut persister dans l'atmosphère pendant des milliers d'années. À mesure que le climat se réchauffe, l'épaisseur de la couche active (la couche qui dégèle de façon saisonnière) augmente, ce qui accélère la décomposition microbienne et accroît les émissions de gaz à effet de serre. Cela stimule à son tour le réchauffement de la planète et le dégel du pergélisol dans une boucle de rétroaction positive.

Les sols pergélisolés de l'Arctique sont parmi les plus grands réservoirs de carbone au monde. Bien que les sols pergélisolés proches de la surface ne représentent que 15 % de la superficie totale des sols, ils contiennent près d'un tiers du carbone des sols de la planète. Les sols du pergélisol contiennent presque deux fois plus de carbone que ce que l'on trouve actuellement dans l'atmosphère. La couche superficielle (0 à 3 mètres de profondeur) contient 65 à 70 % du carbone total du sol du pergélisol, tandis que 25 à 30 % du carbone du pergélisol sont stockés à des profondeurs supérieures à 3 mètres. La région de yedoma en Sibérie et en Alaska, qui est restée libre de glace pendant la dernière glaciation, possède de riches réserves de carbone dans des dépôts épais et profonds. Les deltas des fleuves de l'Arctique renferment d'autres réserves de carbone du pergélisol, soit moins de 10 % du total.

Le pergélisol sous-marin contient également du carbone, à la fois sous forme de carbone organique gelé dans le pergélisol et sous forme de gaz, soit dans des poches de gaz libre, soit piégé dans des hydrates de gaz. La plupart des gaz trouvés dans ce contexte sont des méthanes. Bien que la quantité de carbone organique stockée dans le pergélisol sous-marin soit mal connue, il est probable qu'elle soit considérable, car le pergélisol s'étend jusqu'à 700 mètres de profondeur dans certains endroits.

Les gaz peuvent être empêchés de s'échapper dans l'atmosphère par les couches de pergélisol et d'eau de mer qui les recouvrent. Toutefois, le réchauffement des températures, l'augmentation des tempêtes et la diminution de la glace de mer ont entraîné une augmentation de la température de l'eau au fond de la mer. Avec le dégel du pergélisol sous-marin sus-jacent, le méthane et d'autres gaz pourraient trouver de nouvelles voies à travers les sédiments pour s'échapper dans l'eau, puis dans l'atmosphère. La question de savoir si et à quelle vitesse ce phénomène finira par augmenter les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre est encore à l'étude.

Pour comprendre l'évolution du pergélisol au fil du temps, les scientifiques surveillent l'épaisseur de la couche active, la quantité d'eau souterraine qu'elle contient et la température du sol. Les mesures effectuées sur plusieurs années fournissent des informations précieuses sur l'évolution du pergélisol et aident à anticiper son évolution future. Grâce aux observations par satellite, aux expériences en laboratoire et à la modélisation informatique, les scientifiques dressent un tableau plus complet du pergélisol et de son évolution dans l'Arctique.

De nombreuses questions restent sans réponse concernant le dégel du pergélisol et les émissions de gaz à effet de serre. Les chercheurs continuent à travailler pour obtenir de meilleures estimations de la quantité de carbone contenue dans le pergélisol terrestre et sous-marin ; de la quantité et de la rapidité du dégel du pergélisol dans différents scénarios de réchauffement climatique ; de la quantité de carbone libérée dans l'atmosphère par le dégel des sols, et de la quantité de méthane, de dioxyde de carbone ou d'oxyde nitreux qui sera finalement libérée...



SOURCE : MODIFIÉ DE VIEIRA ET AL. (2019). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



Quand la glace s'épanche

Site canadien des Pingos

La plus grande concentration de pingos au monde – environ 1 350 – se trouve dans la plaine côtière de Tuktoyaktuk, dans l'ouest de l'Arctique canadien. En 1984, le gouvernement du Canada a officiellement créé le Site canadien des pingos. Cette zone protégée unique de 16 kilomètres carrés abrite 8 pingos, dont le pingo d'Ibyuk.

Avec une hauteur de 49 mètres et une base de 300 mètres, le pingo d'Ibyuk est le plus grand du Canada et le deuxième au monde après le pingo de Kadleroshilik en Alaska, haut de 54 mètres. Comme la plupart des pingos, le pingo d'Ibyuk a poussé au fond d'un lac asséché et est entouré d'une énorme couche de glace. Le lac d'Ibyuk existait il y a plus de 12 000 ans, mais il s'est probablement asséché il y a moins de 2 000 ans.

Si le pingo d'Ibyuk et les autres pingos de cette région servent de base à la recherche scientifique depuis plus de 50 ans, ils revêtent également une importance culturelle pour les peuples autochtones. Le mot « pingo » vient de la langue inuite locale, l'Inuvialuktun, et signifie « petite colline ». Le botaniste canadien d'origine danoise Alf Erling Porsild l'a introduit pour la première fois dans la langue anglaise en 1938. Le nom « Ibyuk » est un autre mot inuvialuktun qui signifie « deux monticules proches l'un de l'autre » et c'est ainsi que les populations Inuit autochtones désignaient collectivement le pingo d'Ibyuk ainsi qu'un autre grand pingo, Split Pingo, situé au nord d'Ibyuk.

L'âge d'Ibyuk est estimé à environ 1 300 ans. Les observations montrent que la partie supérieure croissait encore d'environ 2 centimètres par an dans les années 1980. Au sommet se trouve un cratère qui s'est formé lors de l'effondrement de la couverture. Le fond du cratère contient un petit étang qui, selon des observations récentes, s'est peut-être asséché.

Tous les pingos atteignent leur hauteur maximale au bout de plusieurs siècles, mais ils sont également sensibles à l'érosion. Bien que toujours en croissance, Ibyuk commence à montrer des signes d'effondrement. Ses pentes présentent déjà des signes d'affaissement et d'érosion, ce qui donne l'impression qu'il est en train de se diviser en deux parties.



SOURCE : MODIFIÉ DE VIEIRA ET AL. (2019). PAR ALEX TAIT & LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Forage en profondeur

Découvrir les secrets du pergélisol

Les scientifiques ont recours à différentes techniques pour étudier le pergélisol et la façon dont il réagit à l'évolution des conditions environnementales. Le carottage est une technique utilisée pour fournir des informations sur la répartition verticale de la matière organique, de la glace et des sédiments dans les paysages de pergélisol. Le carottier consiste en un long tube creux vissé dans le sol pour prélever de longs cylindres, ou carottes, des matériaux du pergélisol (sédiments, roches, sol, etc.). En laboratoire, les échantillons peuvent être analysés pour déterminer leurs propriétés physiques, leur composition chimique, leur contenu microbien, leur âge et d'autres caractéristiques.

Les sondages par carottage sont le seul moyen de mesurer la répartition verticale de la teneur en glace souterraine, ce qui est essentiel pour comprendre précisément les effets du changement climatique sur le pergélisol. Avec la hausse des températures, la glace de sol de la couche supérieure du pergélisol fond, ce qui finit par provoquer un affaissement du sol. Ce dernier affecte à la fois les établissements humains et les infrastructures (routes, poteaux électriques, pipelines) qui ont été construits à l'origine sur un sol entièrement gelé. Lorsque le sol dégèle, la matière organique stockée dans le pergélisol depuis des millénaires est décomposée par l'activité microbienne et libérée dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone, de méthane et d'oxyde nitreux, ce qui accentue le réchauffement. Le dégel du pergélisol contribue également au réchauffement du climat.

La plaine côtière du Yukon est un exemple de région où le pergélisol est particulièrement riche en glace. Les carottes prélevées dans cette région révèlent toutefois une grande variabilité de la teneur en glace souterraine dans les différents dépôts, la teneur en glace la plus élevée se trouvant dans les moraines et la plus faible dans les dépôts fluvioglaciaires. Des mesures plus précises aideront les scientifiques à mieux prévoir les effets du réchauffement climatique sur l'affaissement, l'érosion et la mobilisation du carbone organique dans les différents paysages.

Outre les carottages, les scientifiques effectuent également une surveillance continue et à long terme de la température du sol dans des trous de forage afin de comprendre les changements qui se produisent dans le pergélisol. Les premières observations systématiques de la température du pergélisol ont débuté dans les années 1930 en Sibérie orientale. Les études initiales étaient réalisées manuellement et nécessitaient plusieurs mesures par jour. Les chercheurs ne pouvaient donc effectuer que des études de surveillance transitoires dans des stations de recherche. Au fil du temps, la technologie a évolué et il est désormais possible de surveiller toute une série de paramètres du pergélisol (température, profondeur de la couche active, teneur en eau, etc.) tout au long de l'année, manuellement ou à distance (voir le graphique sur l'évolution des températures du pergélisol à la section 2.1).

La température du pergélisol est généralement mesurée à l'aide de capteurs de température installés dans des trous forés dans le pergélisol. Les forages sont classés en fonction de leur profondeur : surface (moins de 10 mètres), peu profond (10 à 25 mètres), intermédiaire (25 à 125 mètres) et profond (plus de 125 mètres). L'utilisation d'enregistreurs de données (petits appareils d'enregistrement numérique automatisés) dans les trous de forage réduit la nécessité de se rendre sur place pour prendre des mesures. Il existe désormais des réseaux de forages pour la surveillance à long terme de la température du pergélisol dans l'Arctique et dans d'autres régions pergélisolées du monde. En 2015, le Réseau terrestre mondial pour le pergélisol (GTN-P) comptait 1 074 forages, les plus nombreux se trouvant en Russie (294), aux États-Unis/Alaska (201) et au Canada (194). Le forage le plus ancien du réseau se trouve en Russie. Il a été réalisé en 1957 à une profondeur de 85 mètres.

Carotte de pergélisol *prélevée au printemps 2019 dans la plaine côtière du Yukon. Cette carotte a été prélevée afin d'étudier la répartition de la matière organique, de la glace et des sédiments dans le pergélisol.*

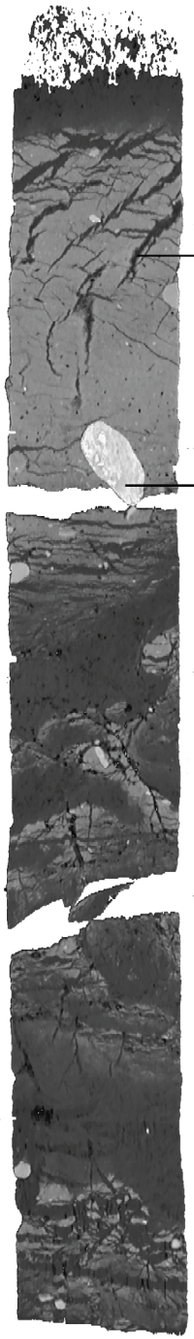
Le partie supérieure de la carotte de pergélisol est composée de matière organique gelée et en décomposition, formant une couche brune d'environ 6 centimètres d'épaisseur.

Les stries horizontales sont un artefact de la technique de carottage qui consiste à visser un tube métallique dans le sol.

Cet échantillon est limité à 60 cm car la technique de carottage n'a pas pu pénétrer le sol sous-jacent plus dur et rocheux.



SOURCE : PIKA ET AL. (EN PRÉPARATION). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



Tomodensitométrie (TDM) *Une tomodensitométrie est similaire à une radiographie utilisée par les médecins dans les hôpitaux. Elle permet aux chercheurs de voir à l'intérieur du pergélisol sans le briser.*

Les bandes plus foncées montrent la glace intercalée dans les sédiments.

Les objets denses, comme ce caillou de 3 centimètres de long, apparaissent plus brillants sur le scanner du trou de forage du pergélisol.



Tomodensitométrie classifiée *Sédiments en orange (mélange gelé composé principalement de minéraux et de matières organiques avec de la glace interstitielle) et glace en bleu (principalement de la glace, mélangée à une petite quantité de sédiments). Cela permet aux chercheurs du pergélisol de calculer leur contribution globale respective.*

Les 22 premiers centimètres de ce forage constituent la couche active. Elle subit des cycles de dégel saisonniers et abrite des plantes et des organismes qui vivent et se développent pendant les mois chauds du printemps et de l'été.

Table de pergélisol

Glace
Sédiments

La glace domine ces couches profondes du pergélisol. Mais des cailloux plus petits et des sédiments plus denses (orange) sont présents dans toute la carotte.



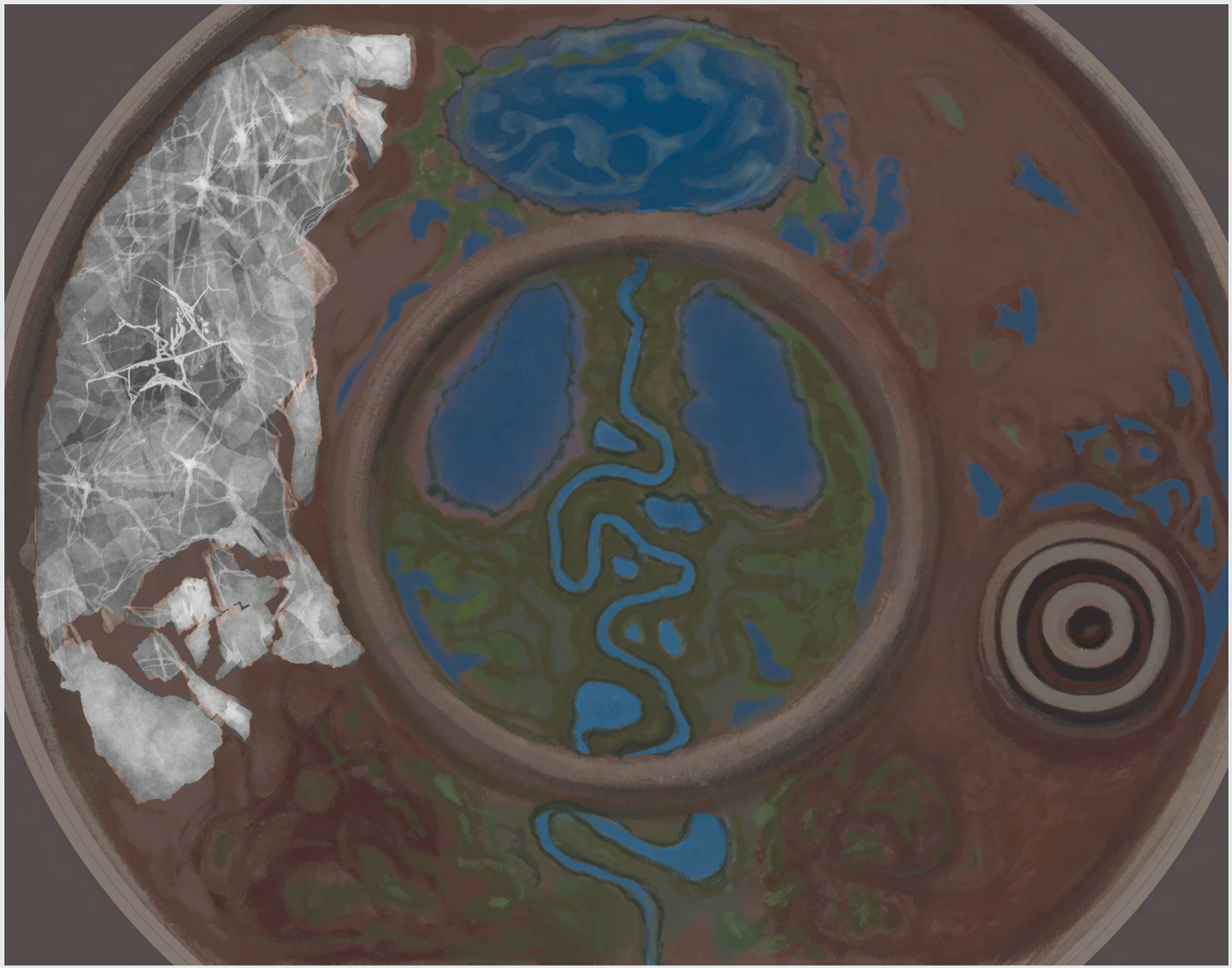
Visualisation 3D *Cette visualisation 3D de la carotte montre principalement l'excès de glace, y compris les sédiments riches en glace. Cette visualisation des données aide les scientifiques à mieux comprendre la structure de la carotte et l'histoire du paysage dans lequel elle a été prélevée.*

La structure des veines de glace est visible au sommet de la carotte.

Structure de glace en forme de lentille visible autour et en dessous de la rupture du noyau.

Cette lentille de glace en suspension se trouve juste à la rupture entre le deuxième et le troisième segment de la carotte.

Ces trous dans la carotte sont remplis de sédiments.



© Olga Borjon-Privé (Oluko)

PORTRAIT PRÉSIDENTE-DIRECTRICE GÉNÉRALE ET SCIENTIFIQUE PRINCIPALE CHEZ B.GEOS GMBH, AUTRICHE

Annett Bartsch

À l'école déjà, je m'intéressais à l'Arctique, attirée par les récits des vastes paysages froids et des expéditions de recherche qui s'y déroulent. Lorsque j'étais étudiante en géographie, j'ai voyagé au Svalbard où j'ai fait des présentations sur le pergélisol et la géomorphologie à d'autres étudiant.e.s. Aujourd'hui, je suis spécialiste de la télédétection, je dirige des projets internationaux et je trouve de nouvelles façons d'utiliser l'imagerie satellitaire pour analyser le pergélisol dans l'Arctique.

L'un des principaux défis de la cartographie du pergélisol à partir de l'imagerie satellitaire tient au fait que le pergélisol est un phénomène souterrain. Malgré cela, il existe différentes façons d'utiliser l'imagerie pour cartographier et étudier le dégel du pergélisol. Tout d'abord, les températures à la surface du sol peuvent aider à modéliser la présence de pergélisol. Deuxièmement, les caractéristiques de la surface terrestre associées au pergélisol peuvent être observées et analysées sur l'imagerie. La masse des lacs de l'Arctique, par exemple, est le résultat de la fonte du pergélisol. Le pergélisol peut également être surveillé depuis l'espace en analysant les affaissements et soulèvements du sol, qui sont également liés aux propriétés intrinsèques de ce dernier : plus il y a de glace dans le sol, plus les changements à la surface sont importants au cours d'une saison. La présence très fréquente de nuages dans l'Arctique constitue un défi supplémentaire pour la cartographie des caractéristiques du paysage. Les scientifiques comme moi utilisent les données des satellites radar qui peuvent voir à travers les nuages, mais ce type de données est encore coûteux et difficile à obtenir à une très haute résolution.

En été, je passe de nombreuses nuits en Sibérie ou en Scandinavie à dormir sous la tente et à recueillir des mesures sur le terrain. Ces mesures permettent de faire le lien entre ce qui est mesuré sur les images satellites et ce qui se passe sur le terrain. La collaboration avec les experts locaux est très importante. En Sibérie, nous travaillons avec des scientifiques russes qui installent souvent des camps à proximité de trous de forage contenant des instruments de mesure du pergélisol. Aujourd'hui, les drones sont également utilisés pour combler le fossé entre l'imagerie satellitaire et les observations sur le terrain.

L'un des principaux objectifs de l'application de la télédétection à l'étude du pergélisol est d'améliorer les modèles climatiques et d'évaluer l'impact de la fonte du pergélisol. Le pergélisol dégèle dans tout l'Arctique et les conséquences sont complexes, tant au niveau local que mondial. Grâce à la télédétection, nous pouvons dresser des cartes très intéressantes, comme nous l'avons fait récemment en cartographiant toutes les infrastructures situées dans un rayon de 100 kilomètres du littoral arctique. Mais si nous voulons répondre aux grandes questions, nous devons aller plus loin. Pour cela, il faut que des spécialistes de différents domaines travaillent avec des experts en télédétection, y compris des modélisateurs du climat terrestre et des spécialistes de terrain, qui ont une bonne compréhension des processus locaux.

De nombreuses questions restent en suspens, mais la technologie a déjà beaucoup progressé pour y répondre. Pendant mes études, il était très difficile d'avoir accès aux données et la résolution était très faible par rapport à aujourd'hui. Désormais, il y a tellement de données qu'il est difficile d'élaborer des méthodes permettant de tout traiter. Cela nécessite une grande puissance de calcul. Nous avons besoin d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique pour traiter ces données, ce qui, dans les années à venir, sera au cœur de l'informatique dématérialisée.

Des implantations humaines instables

La vie sur un sol gelé

Des humains vivent dans l'Arctique depuis des milliers d'années, et se sont adaptés à la vie dans cet environnement hostile en transmettant leurs connaissances aux générations suivantes. Aujourd'hui, environ cinq millions de personnes vivent dans la zone de pergélisol circumpolaire arctique, définie par l'étendue du pergélisol circumpolaire septentrional dans les huit pays arctiques. L'Arctique compte actuellement 1 162 implantations sur son pergélisol. Près de 90 % d'entre eux comptent moins de 5 000 habitants, mais la plupart des habitants de cette région, soit environ 4 millions, vivent dans les 123 colonies les plus importantes, dont la taille varie entre 5 000 et 360 000 habitants. La plupart des grandes colonies, soit 85 %, se trouvent dans l'Arctique russe.

Le plus grand nombre d'établissements de pergélisol, plus de 65 % d'entre eux, se trouvent dans la zone de pergélisol sporadique, dans la partie méridionale des régions de pergélisol. À moins d'être situées directement sur le pergélisol, ces communautés peuvent ne pas être immédiatement affectées par la fonte du pergélisol, mais elles seront toutes affectées par les changements qui se produisent dans l'environnement proche. Les établissements humains situés dans les zones de pergélisol continu et discontinu peuvent subir des impacts significatifs à mesure que le pergélisol sous-jacent se dégrade en raison du changement climatique. C'est le cas de Iakoutsk et Norilsk, deux des plus grandes agglomérations de l'Arctique avec une population cumulée de 486 000 habitants.

Construire des structures stables et durables sur le pergélisol est un défi majeur car le pergélisol est de moins en moins permanent ou stable. À mesure que l'activité humaine se développe dans l'Arctique et que le réchauffement climatique se poursuit, il devient de plus en plus important de comprendre de quelle manière les infrastructures pourraient être affectées et comment les rendre plus résistantes. Construire sur des sols gelés peut entraîner le dégel et l'affaissement du pergélisol sous-jacent, entraînant des dommages sur les bâtiments. Ces dommages peuvent aller de fissures mineures dans les murs à des défaillances structurelles majeures. Les infrastructures de transport – routes, pistes d'atterrissage, voies ferrées, ponts, etc. – sont également susceptibles d'être endommagées par le dégel du pergélisol. Des solutions techniques, telles que la construction de talus routiers permettant à la chaleur de s'échapper, sont nécessaires. Dans les régions trop humides pour y aménager des voies routières, les gens roulent uniquement sur des routes de glace hivernales construites sur des marais gelés ou sur des lacs et des rivières gelés. La glace épaisse peut supporter de très gros camions apportant du matériel et des fournitures aux communautés et aux exploitations industrielles. Ces routes sont saisonnières et doivent être reconstruites chaque hiver ; et comme le climat continue à se réchauffer, elles deviennent moins fiables et ont une durée de vie plus courte.

Contrairement à d'autres régions, la majeure partie des eaux souterraines du pergélisol est gelée. Dans les zones de pergélisol discontinu, il est parfois possible de forer le sol non gelé pour atteindre l'eau souterraine. En revanche, dans les zones de pergélisol continu, l'eau potable provient souvent de lacs, de rivières ou de la fonte de la glace et de la neige. Certaines communautés construisent des conduites d'eau isolées et surélevées pour alimenter leurs maisons en eau courante.

Les opérations industrielles (par exemple, l'exploitation minière, pétrolière et gazière) nécessitent également des précautions particulières pour empêcher le dégel du pergélisol. Les puits profonds nécessaires à l'extraction du pétrole et du gaz peuvent être gainés en ciment pour éviter qu'ils ne s'effondrent, tandis que les équipements en surface peuvent être construits sur des socles en béton. Comme le pétrole doit être maintenu à une température supérieure à 60 °C pour pouvoir s'écouler, les pipelines sont souvent construits en surface pour ne pas dégeler le pergélisol et risquer d'endommager les conduites.

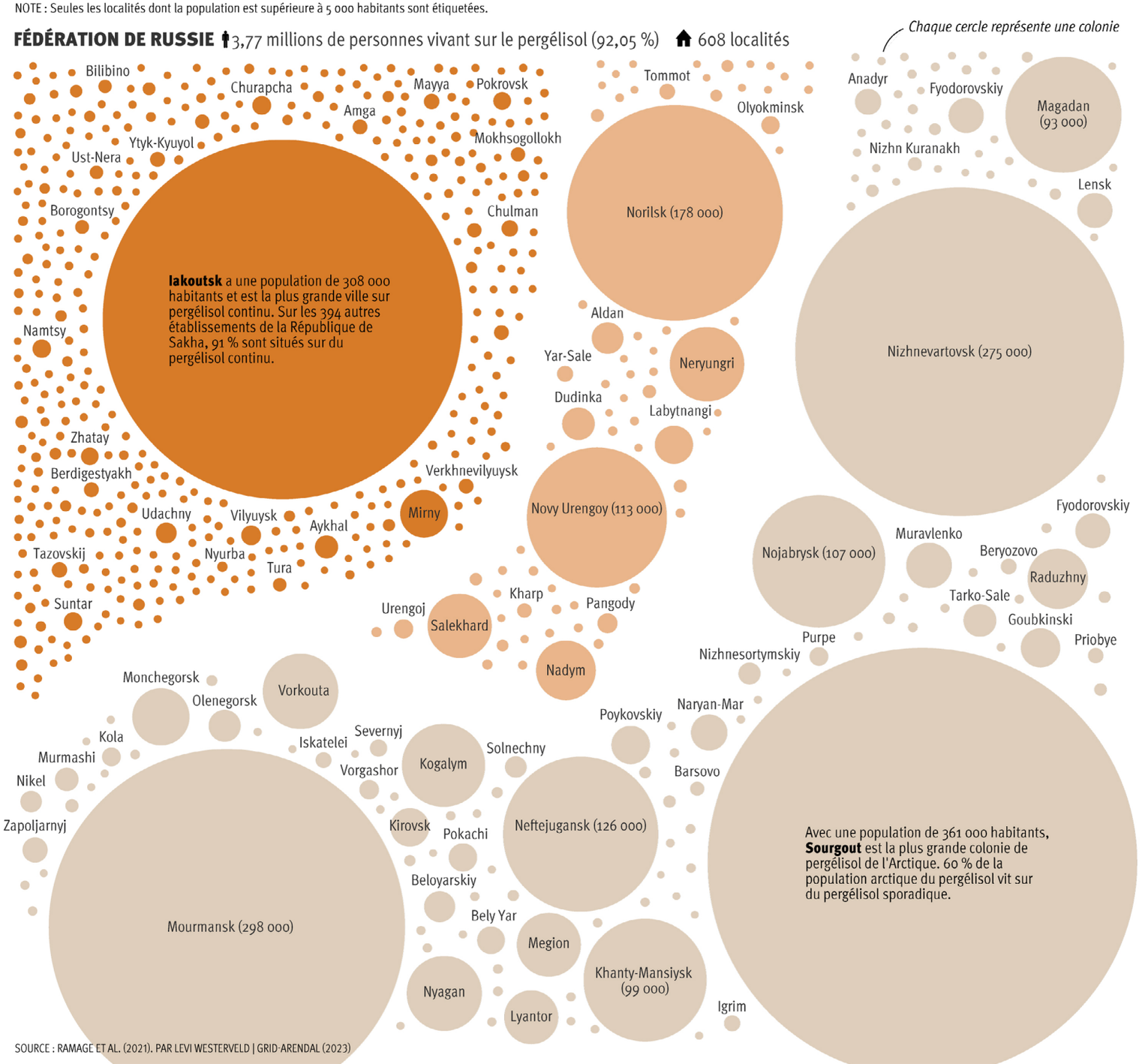
Les peuples autochtones et les communautés locales dépendent du pergélisol pour bien plus que la stabilisation des bâtiments et autres infrastructures. Nombre d'entre eux vivent encore selon des modes de vie traditionnels ou semi-traditionnels, et dépendent de la chasse, de la pêche et de la cueillette pour subvenir à leurs besoins, ainsi qu'à ceux de leurs familles et de leurs communautés. Connaître et comprendre les caractéristiques du pergélisol est essentiel pour répondre à ces besoins. Les éleveurs de rennes, par exemple, s'appuient sur leur connaissance du pergélisol pour déterminer à quelle vitesse le passage de leurs troupeaux transformera la surface en boue. Cela détermine l'endroit où les éleveurs établiront leurs camps, la durée de leur séjour et les déplacements de troupeaux qu'ils pourront effectuer. L'effet du pergélisol sur le paysage et la végétation locale joue également un rôle dans le comportement des rennes.

Les habitants utilisent aussi le pergélisol comme solution naturelle pour la conservation des aliments. Depuis des milliers d'années, les autochtones exploitent les températures négatives stables du pergélisol et construisent des caves souterraines dans lesquelles ils conservent le poisson et le gibier. Ces caves traditionnelles sont creusées dans la couche supérieure du pergélisol, sous la couche active, et dotées d'une porte qui protège l'entrée de l'air chaud en été et décourage l'accumulation de neige isolante en hiver.

Colonies de peuplement du pergélisol arctique

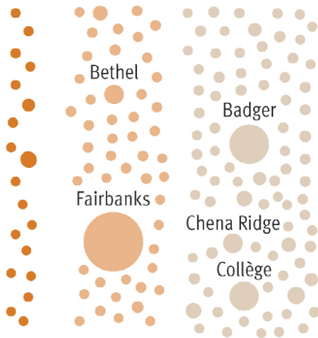
Continu Discontinu Sporadique

NOTE : Seules les localités dont la population est supérieure à 5 000 habitants sont étiquetées.

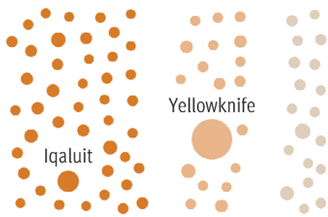


SOURCE : RAMAGE ET AL. (2021). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

É-U 154 000 (3,8 %) 152



CANADA 94 000 (2,3 %) 82



KALAALLIT NUNAAT (GROENLAND) 45 000 (1 %) 58



SUÈDE 19 000 (0,5 %) 5



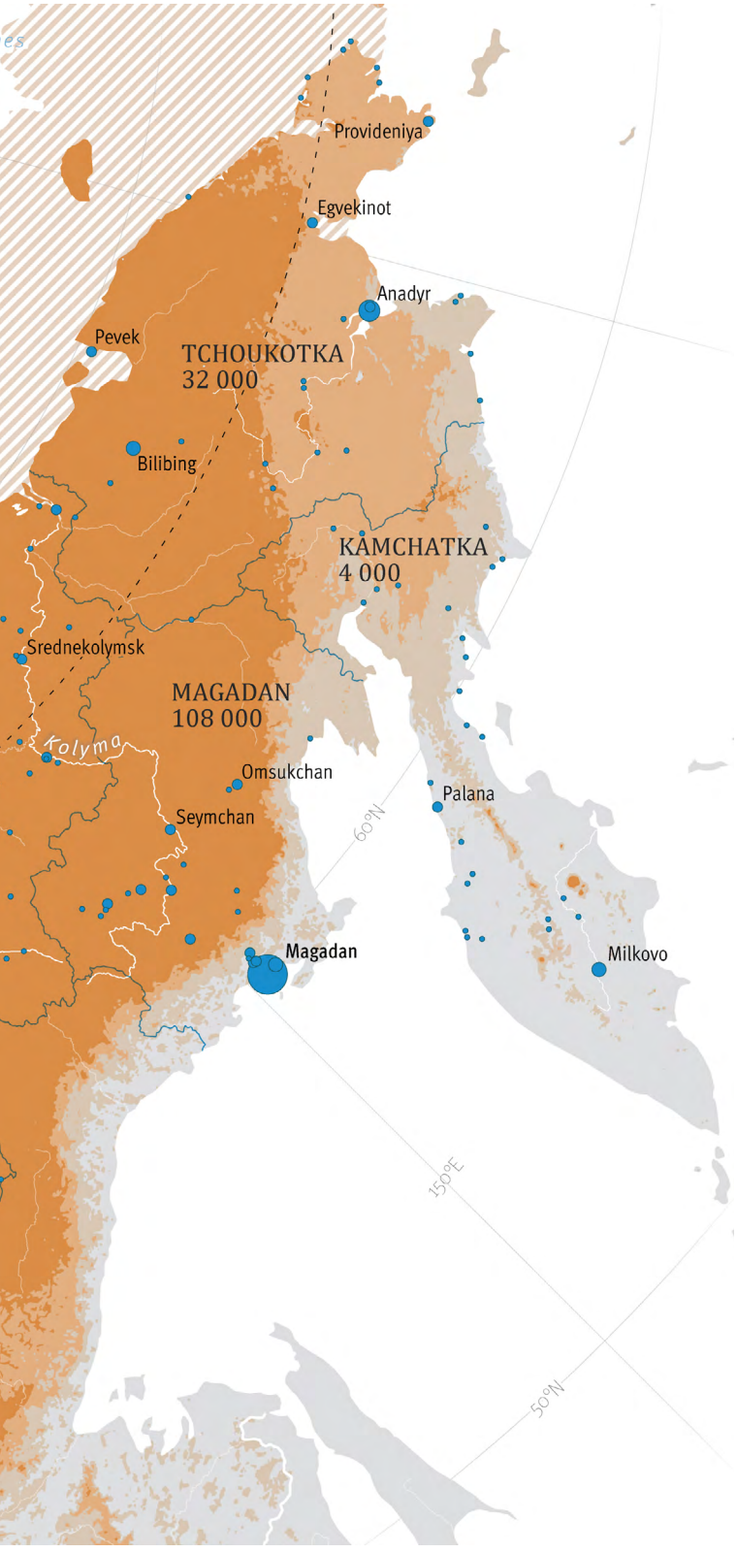
NORVÈGE 12 000 (0,3 %) 9

ISLANDE 1 300 (0,03 %) 3

FINLANDE 500 (0,01 %) 2



SOURCES: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY AND EASY VIEW CARTOGRAPHIC, INC. (2019); OBU *ET AL.* (2019); RAMAGE *ET AL.* (2021). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



États gelés I

Fédération de Russie

La majeure partie du pergélisol de l'Arctique se trouve en Russie. Environ 65 % du pays est recouvert de pergélisol, principalement dans la zone continue. La Russie abrite 85 % des grandes communautés du pergélisol de l'Arctique, c'est-à-dire celles qui comptent 5 000 habitants ou plus.

Contrairement à la plupart des autres régions de l'Arctique, la plupart des établissements humains sur le pergélisol russe se trouvent à l'intérieur des terres et sur du pergélisol continu. Sur les 713 établissements sur pergélisol, 401 se trouvent dans la zone continue, 241 dans la zone sporadique et 71 dans la zone de pergélisol discontinu.

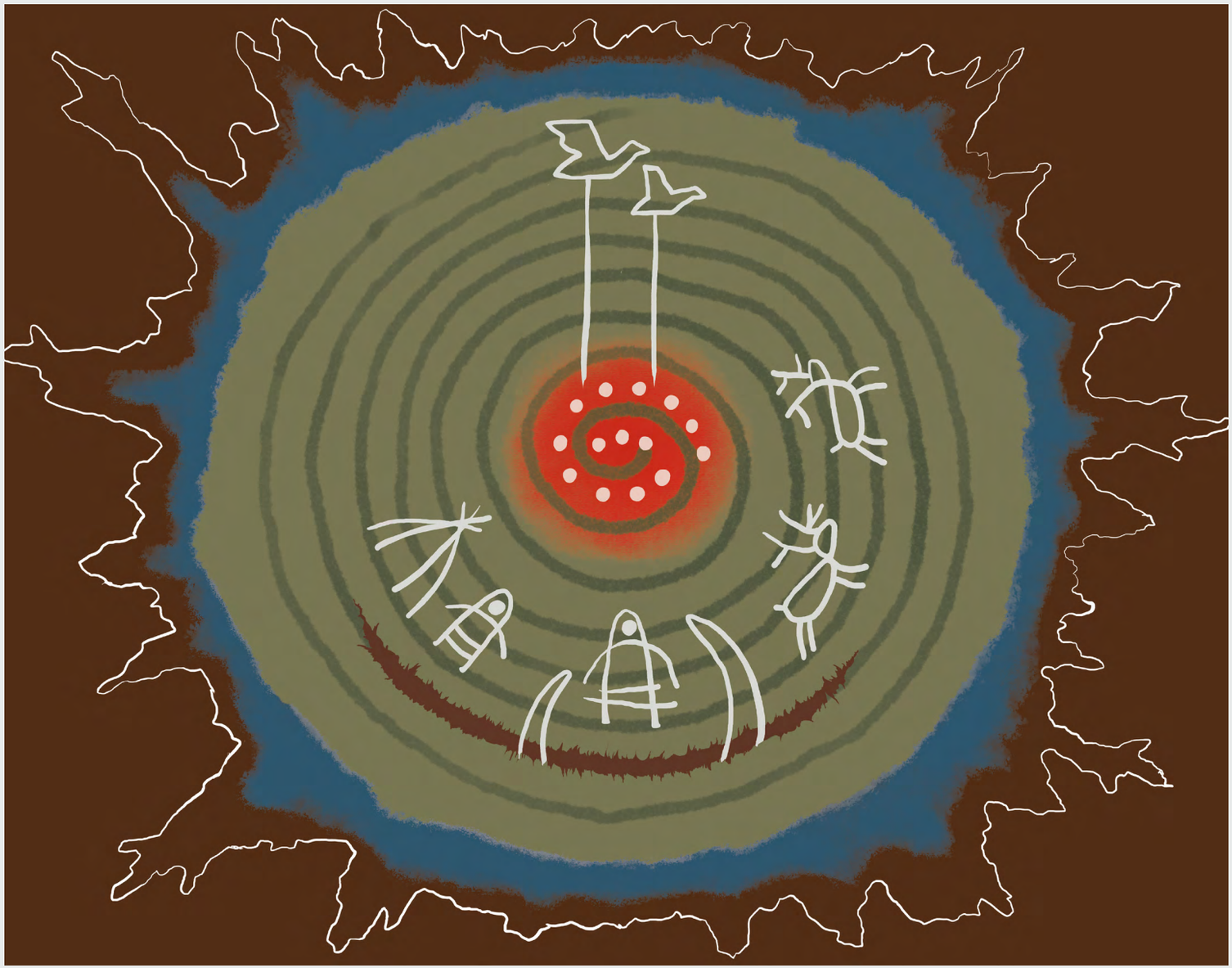
Quarante groupes distincts de peuples autochtones vivent dans le Nord, en Sibérie et dans l'Extrême-Orient russe. Les plus importants sont les Dolganes, les Nganassanes, les Nénèts, les Saamis, les Khantys, les Tchouktches, les Evenks, les Évènes, les Énets, les Yupiks et les Youkaghirs. Nombre d'entre eux continuent de pratiquer les activités traditionnelles d'élevage de rennes, de pêche et de chasse.

Sur les quelques 2,2 millions de rennes domestiqués dans l'Arctique, 1,5 million se trouvent en Russie. Les principales zones d'élevage de rennes se trouvent en Iamalo-Nénètsie, en République de Sakha (Iakoutie) et en Tchoukotka. Le peuple Nénètse est considéré comme le plus grand groupe d'éleveurs de rennes nomades au monde. Près de la moitié des Nénéts (environ 20 000 personnes) continuent d'élever des rennes aujourd'hui. Les éleveurs de rennes sont souvent nomades, se déplaçant avec leurs troupeaux des pâturages d'hiver dans la toundra forestière et la taïga du Nord aux pâturages d'été sur la côte de l'océan Arctique. Chaque groupe d'éleveurs peut s'occuper de centaines ou de milliers de rennes.

Les changements saisonniers causés par le dégel et le gel du sol influencent les activités des éleveurs de rennes. Dans certaines régions, le dégel de la couche active en été peut transformer le sol en une couche de boue semi-liquide, rendant les déplacements difficiles, voire dangereux, pour les éleveurs et les rennes. Cette couche de boue peut être due à la fois à des causes naturelles et à l'activité humaine ou animale, comme le piétinement. En « déchiffrant » les conditions météorologiques locales, les éleveurs expérimentés sont à même de déterminer la probabilité que ce phénomène se produise, afin dedéplacer leur troupeau vers un terrain plus sûr.

Le paysage de pergélisol influence également les déplacements. Les reliefs tels que les polygones de glace doivent être traversés sous le bon angle pour éviter de casser le traîneau. De même, les ravins étroits créés sur les flancs des collines ou les rives des rivières par le dégel et le glissement du pergélisol sont utilisés par les bergers pour monter et descendre les pentes abruptes de manière plus sûre.

Les éleveurs utilisent également leur connaissance du paysage et de la végétation –tous deux influencés par les processus du pergélisol – pour surveiller et anticiper le comportement de leurs rennes, en les déplaçant vers les endroits souhaités selon les besoins. De même, les différents plans d'eau des paysages de pergélisol influencent également les déplacements des éleveurs et de leurs animaux. Les lacs thermokarstiques sont importants pour les éleveurs, qui les considèrent comme plus propres que les autres sources d'eau potable. Ces lacs permettent également de rafraîchir les rennes et d'échapper aux insectes en été.



© Olga Borjon-Privé (Oluko)

PORTRAIT PRÉSIDENT DU CONSEIL DES ANCIENS DU PEUPLE YOUKAGHIR, NELEMNOYE, RUSSIE

Vyacheslav Shadrin

Je suis né en 1967 dans le village de Nelemnoye, dans la région de la Haute Kolyma de la République de Sakha (Iakoutie). Je suis à la fois chercheur, spécialisé dans l'histoire et la culture des minorités autochtones du nord de la Russie, et président du Conseil des Anciens du peuple Youkaghir. Mon rôle de président m'amène à beaucoup voyager et à visiter des communautés dans tout l'Arctique russe.

Le pergélisol recouvre 80 % de la Iakoutie, y compris mon village natal de Nelemnoye, situé juste en dessous du cercle polaire arctique, dans une forêt de subtundra ouverte. Ce village youkaghir se compose de 40 bâtiments situés à quelques centaines de mètres à l'ouest de la rivière Yasachnaya, un affluent de la Kolyma. Environ 300 personnes vivent dans le village, dont 200 sont des Youkaghirss, un groupe de peuples indigènes du nord-est de l'Asie. D'après les derniers recensements de la population, il ne reste plus que 1 603 Youkaghirss aujourd'hui.

Les changements climatiques limitent nos pratiques traditionnelles de pêche et de chasse. La pêche d'automne sur la banquise, qui commençait historiquement vers la fin du mois d'octobre, ne peut plus avoir lieu, ou est devenue très dangereuse, car la glace est encore assez fine à ce moment-là. Les pratiques de chasse ont également été affectées. La chasse au cerf porte-musc a généralement lieu en novembre, lorsque les animaux migrent de leurs pâturages d'été vers leurs pâturages d'hiver. Mais comme la route de glace n'est plus accessible si tôt, les terrains de chasse traditionnels sont impossibles ou très dangereux d'accès. La chasse qui a lieu plus tard dans l'hiver est moins rentable, car la qualité de la fourrure est inférieure.

L'élevage de rennes, un moyen de subsistance important pour les communautés traditionnelles de l'Arctique, est également affecté par le dégel du pergélisol. Les basses terres sont plus humides et plus boueuses, et les rennes perdent parfois du poids et tombent malades. Les éleveurs sont également de plus en plus dépendants de technologies telles que le GPS pour trouver leur chemin. Il y a trente ou quarante ans, il était impossible d'imaginer qu'un éleveur puisse se perdre, car tous connaissaient très bien la toundra. La perte de leurs savoirs ancestraux les rend plus vulnérables.

Traditionnellement, les caves souterraines creusées dans le sol gelé étaient utilisées pour conserver la viande, le poisson et les baies. Aujourd'hui, ces congélateurs souterrains dégèlent en raison du réchauffement climatique. Nombre d'entre eux s'effondrent et ne sont plus utilisés. Ils sont remplacés par des réfrigérateurs, mais ceux-ci nécessitent de l'électricité en permanence et sont vulnérables aux pannes de courant. J'estime que 80 % du régime alimentaire des habitants de Nelemnoye se compose aujourd'hui d'aliments achetés dans les magasins. Dans ma jeunesse, seuls des produits tels que le sucre, le sel et le thé étaient achetés dans les magasins ; le reste était récolté dans la nature. Les cas de diabète sont de plus en plus fréquents dans les communautés indigènes du nord. Nous sommes victimes de ce système. Nous n'avons pas choisi ce mode de vie.

Avec la diminution du nombre de pêcheurs et de chasseurs, de plus en plus de personnes recherchent des défenses et des os de mammouths, qui peuvent atteindre des prix élevés sur le marché noir. Ces fossiles apparaissent à la surface de la toundra lorsque le pergélisol dégèle. Mais la recherche de défenses de mammouth va à l'encontre des croyances traditionnelles. Traditionnellement, nous associons les mammouths et leurs esprits au monde souterrain. C'est de là que viennent les mauvaises choses. Dans le passé, les restes de mammouths apparaissaient principalement lors d'inondations et sur les berges érodées des rivières, et ils sont donc associés à ces événements. Lorsque ces défenses et ces ossements refont surface dans la toundra, une porte s'ouvre entre le monde souterrain et le monde intermédiaire où vivent les hommes.

Les politiciens et les scientifiques parlent toujours de la nécessité de développer des stratégies d'adaptation. Or ces stratégies ne nous concernent pas. C'est notre vie, notre quotidien. Nous vivons dans ces conditions et nous nous adaptons en permanence. Pour les peuples autochtones, le changement climatique est une menace réelle qui entraîne de nombreux défis ayant un impact sur nos moyens de subsistance traditionnels et conduisant à une diminution du nombre de personnes impliquées dans les activités traditionnelles.

États gelés II

Amérique du Nord

En Amérique du Nord, la zone de pergélisol circumpolaire arctique englobe l'État de l'Alaska aux États-Unis et le Yukon, les Territoires du Nord-Ouest, le Nunavut, le Nunavik, le Nunatsiavut et le sud du Labrador au Canada. Environ 80 % de cette région est recouverte de pergélisol. Elle est dominée par des pergélisols continus et discontinus dans l'Arctique occidental et l'archipel Arctique, tandis que les pergélisols sporadiques et isolés sont de plus en plus fréquents dans l'Arctique oriental et l'intérieur de l'Alaska.

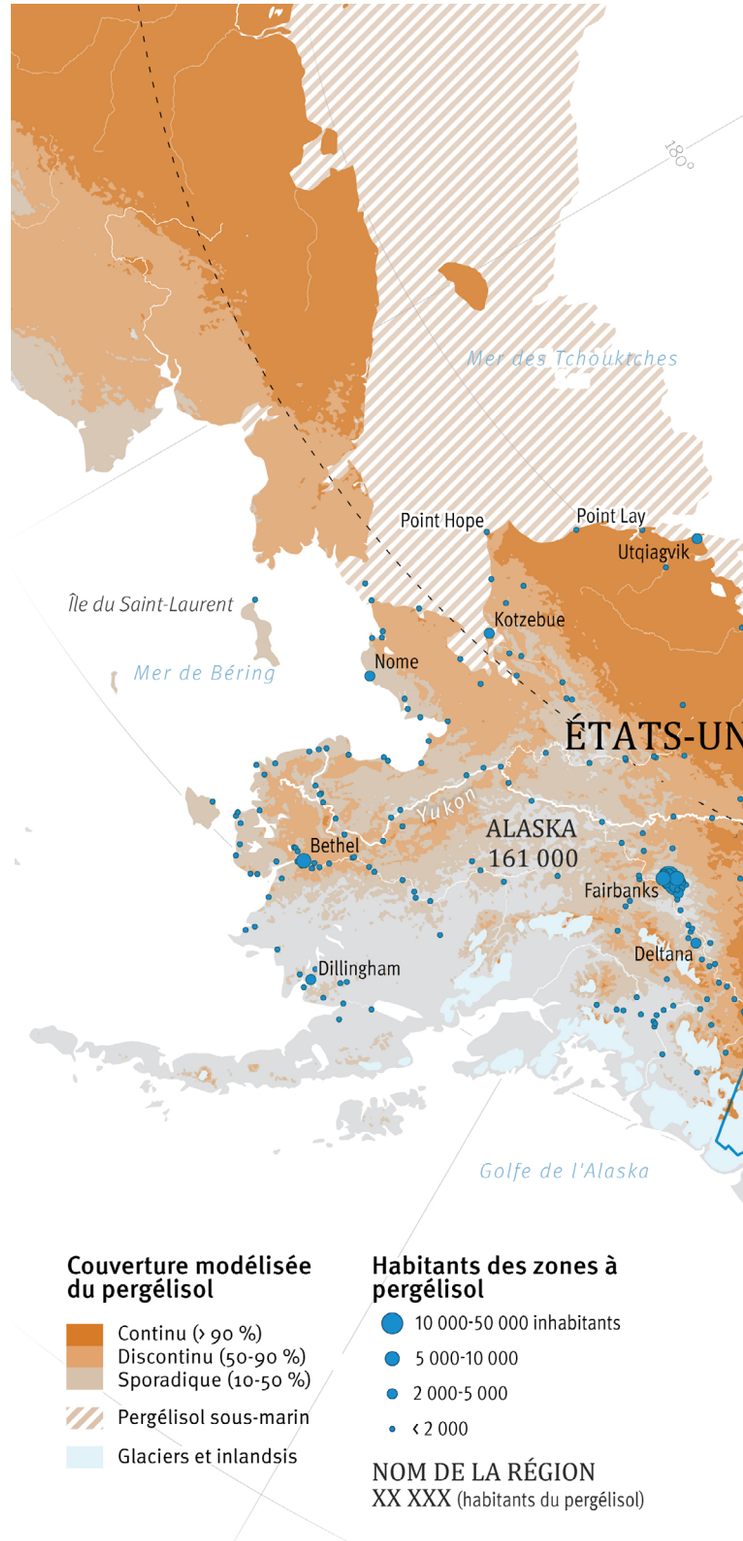
Sur les 300 établissements sur pergélisol dans l'Arctique canadien et alaskien, 63 se trouvent dans la zone de pergélisol continu, 69 dans la zone discontinue et 168 sur du pergélisol sporadique. Près de la moitié des établissements de cette région sont situés sur le littoral et la plupart d'entre eux se trouvent sur du pergélisol continu. Alors que de nombreux peuples autochtones vivent de la chasse et de la pêche de subsistance, l'extraction des ressources minières, pétrolières et gazières est une activité économique importante dans les deux pays.

Le pergélisol pose des défis uniques aux nombreuses communautés de cette région. Les côtes pergélisolées sont exposées à des taux élevés de recul côtier en raison de périodes plus longues d'eau libre le long de la côte, d'étés plus chauds et d'une fréquence et d'une intensité accrues des tempêtes. Les communautés côtières, en particulier celles de l'Arctique occidental, sont touchées par l'érosion et l'affaissement, qui affectent les infrastructures locales, la couverture terrestre et les sites culturels.

Plus de 20 communautés du Canada et de l'Alaska ont déjà été déclarées menacées par l'érosion côtière. À Shishmaref, en Alaska, le taux d'érosion côtière est si élevé que les habitants ont voté en faveur du déménagement de la ville sur le continent. Dans le hameau de Tuktoyaktuk, dans les Territoires du Nord-Ouest (Canada), certaines maisons considérées comme les plus exposées au risque d'effondrement dans l'océan Arctique ont été déplacées plus à l'intérieur des terres, à grands frais. Le hameau met actuellement en œuvre un plan visant à ralentir l'érosion, mais à terme, la communauté devra envisager une relocalisation.

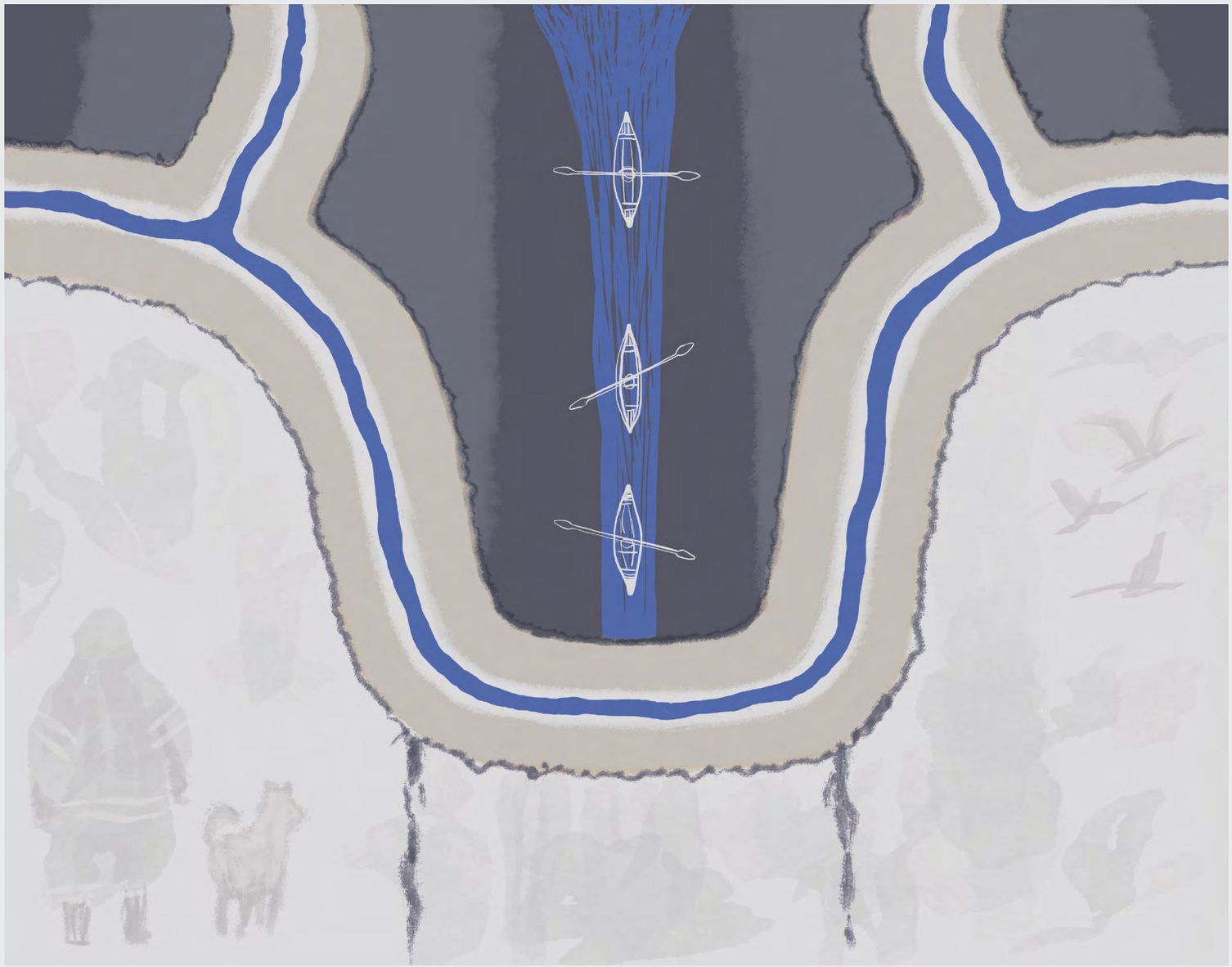
Les installations industrielles et militaires ainsi que les infrastructures communautaires essentielles situées le long de la côte arctique occidentale de l'Amérique du Nord sont également menacées par l'accélération de l'érosion côtière et des vagues de tempête. Comme toutes les structures de l'Arctique ont été conçues pour des conditions stables de pergélisol, beaucoup montrent aujourd'hui des signes d'instabilité en raison de l'augmentation du tassement dû au dégel et du soulèvement saisonnier dû au gel. Nombre d'entre elles devront faire l'objet de travaux de modernisation coûteux si elles veulent rester viables à l'avenir. De nombreux bassins, conçus pour contenir les contaminants tels que la boue de forage dans le pergélisol d'anciens puits de prospection pétrolière et gazière dans la région du delta du Mackenzie, sont désormais instables ou s'effondrent, laissant s'échapper des fluides toxiques.

Le pergélisol sous-marin est présent au large de de la côte ouest de l'Arctique canadien et de l'Alaska, ainsi qu'au large du littoral septentrional de l'Eurasie. Bien que l'exploitation offshore soit actuellement limitée, il existe un potentiel considérable pour l'exploitation à grande échelle du pétrole et du gaz à l'avenir. Les connaissances sur la répartition et les propriétés du pergélisol sous-marin sont encore limitées et des recherches supplémentaires sont nécessaires de manière à garantir la sécurité des opérations dans cet environnement.





SOURCES: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY AND EASY VIEW CARTOGRAPHIC, INC. (2019); OBU *ET AL.* (2019); RAMAGE *ET AL.* (2021). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



© Olga Borjon-Privé (Oluko)

PORTRAIT COORDINATEUR ENVIRONNEMENTAL AU GWICH'IN RENEWABLE RESOURCES BOARD, AKLAVIK, NWT, CANADA

Jessi Pascal

Je me décrirais comme quelqu'un d'indépendant, attaché à la famille et amoureux de la nature. J'ai trois frères et sœurs et nous vivons à Aklavik, un hameau d'environ 500 habitants situé dans la région d'Inuvik, dans les Territoires du Nord-Ouest, au Canada. J'ai récemment quitté Inuvik, le centre administratif de la région, pour revenir à Aklavik, à une cinquantaine de kilomètres à l'ouest.

À Aklavik,tout le monde se connaît et tout le monde s'entraide. C'est ce que j'aime le plus dans notre communauté. Le village est situé le long de la rivière Peel [canal Peel du delta du Mackenzie], qui fournit à notre communauté toute l'eau dont nous nous servons pour boire, nous doucher et nous laver. L'hiver est froid et blanc. Les montagnes à l'ouest sont absolument magnifiques. Beaucoup de gens utilisent des poêles à bois comme source de chaleur, y compris mes parents, car l'achat de mazout pour la chaudière est assez coûteux. Je transporte du bois pour eux chaque fois que je le peux.

Le printemps est le temps des carnavals et de la chasse à l'oie. Chaque communauté du delta du fleuve Mackenzie organise ces carnavals, qui comprennent des attractions telles que des courses de motoneige, des courses de traîneaux à chiens et des concours de lancer d'œufs. Ces carnavals ont été annulés en 2021 à cause de COVID-19. En été, de nombreuses personnes, dont ma famille, partent pêcher, soit dans la rivière Peel, soit à Shingle Point, dans l'océan Arctique. À l'automne, beaucoup de gens chassent le lapin, dans les champs ou dans le delta. Il se passe toujours quelque chose.

L'une de mes premières rencontres avec le pergélisol a eu lieu lorsque j'ai vu mon chien atteindre le pergélisol alors qu'il creusait le sol. Je ne savais pas très bien ce qu'était le pergélisol quand j'étais enfant. Mais j'ai trouvé très intéressant qu'un chien puisse creuser quelques mètres et tomber soudainement sur le pergélisol !

Le fait d'être situé sur le pergélisol signifie qu'Aklavik a dû s'adapter à bien des égards. Aucune canalisation, par exemple, n'est souterraine. Les eaux usées sont évacuées par un véhicule qui se déplace jusqu'au village. Tous les bâtiments sont construits en hauteur par rapport au sol pour les protéger des inondations. Mais en raison de la fonte du pergélisol, de nombreuses infrastructures sont menacées. Récemment, nous avons dû emprunter des crics et nous avons redresser la maison de mon père pour la remettre à niveau.

Il n'y a pas de route pour entrer ou sortir d'Aklavik. En été, les bateaux sont utilisés comme moyen de transport pour traverser le delta du Mackenzie. En hiver, les motoneiges et les camions peuvent circuler sur la route de glace. Mais avec le changement climatique, ces paysages sont en train de changer. Je sors avec mes amis pour vérifier nos pièges et il fait très froid, puis soudain nous nous enfonçons dans la gadoue. C'est très imprévisible. Je ne sais pas si c'est directement lié au pergélisol.

En réfléchissant aux conséquences du dégel du pergélisol sur ma communauté, il est clair que les gens d'ici en savent très peu. Cela ne faisait pas partie du programme de mon lycée, par exemple. J'ai l'impression que ce n'est pas considéré comme une priorité dont les gens devraient être informés. Dans le cadre de mon travail avec le Secrétariat conjoint de la région désignée des Inuvialuit, j'ai interrogé de nombreuses personnes sur des sujets tels que le pergélisol, les poissons, les animaux, la météo, etc. Mais le sujet qui m'a posé le plus de problèmes est le pergélisol. C'est un sujet que les gens connaissent et dont ils ont entendu parler, mais dont ils ne comprennent pas l'aspect scientifique et la façon dont il affecte nos vies. Je pense qu'un peu plus d'éducation sur le sujet serait bénéfique pour notre communauté. Après tout, le pergélisol se trouve littéralement sous nos pieds.

États gelés III
Région nordique

On trouve le pergélisol de la région nordique de l'Arctique au Kalaallit Nunaat (Groenland), en Islande, dans les parties septentrionales de la Norvège (Nordland, Troms, Finnmark), au Svalbard, en Suède (Norrbotten) et en Finlande (Lappi). Cette région compte 149 établissements humains, dont la plupart sont situés dans la zone de pergélisol sporadique. Seuls le Kalaallit Nunaat et Svalbard ont des établissements dans la zone de pergélisol continu (23 et 2 établissements, respectivement), tandis que seul le Kalaallit Nunaat a des établissements dans la zone de pergélisol discontinu (22 établissements). Tous les établissements humains du Kalaallit Nunaat et du Svalbard situés dans la zone de pergélisol sont côtiers.

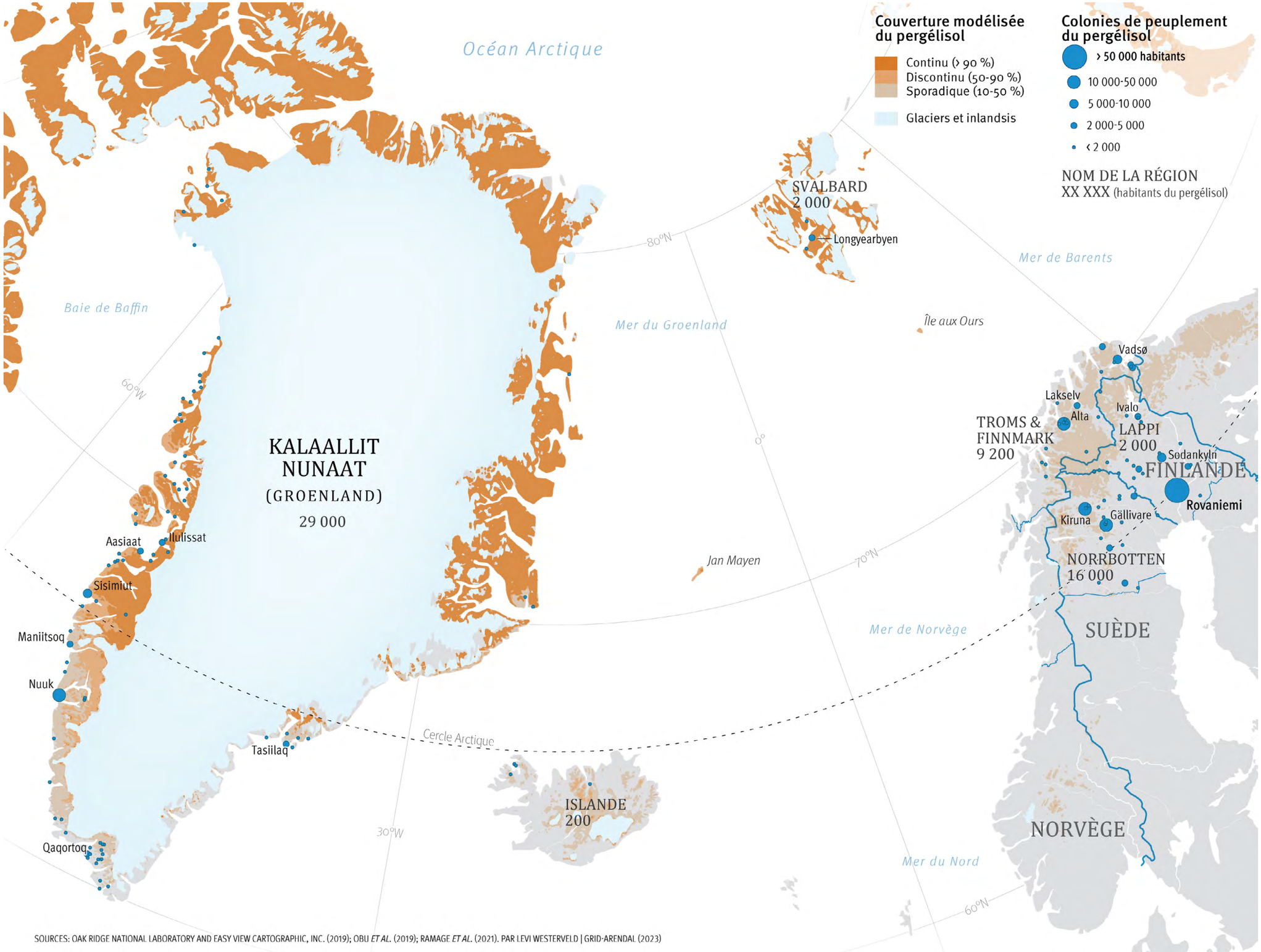
Bien que faisant géopolitiquement partie de l'Europe, le Kalaallit Nunaat fait géographiquement et géologiquement partie de l'Amérique du Nord et, à ce titre, partage de nombreuses caractéristiques avec l'est de l'Arctique canadien. À l'instar de cette région, de nombreuses habitations sont construites sur le socle rocheux, ce qui signifie qu'elles ne risquent pas d'être déstabilisées par le dégel du pergélisol et sont donc moins vulnérables à l'effondrement que les sédiments riches en glace du pergélisol. De nombreuses infrastructures, en revanche, se trouvent sur un pergélisol vulnérable. La zone située entre le parking et la piste de l'aéroport de Kangerlussuaq a été gravement affectée par le dégel du pergélisol. Des dégâts ont également été signalés sur les infrastructures communautaires environnantes, en particulier les réseaux routiers.

Au nord-est du Kalaallit Nunaat, se trouvent Zackenberg Ecological Research Operations, une station de recherche établie en 1995 dans le but de faciliter la recherche sur les écosystèmes de l'Extrême-Arctique. Située à 74 ° N, la station se trouve dans la zone de pergélisol continu, avec une couche active de 20 à 100 centimètres d'épaisseur. L'éloignement de la station a été jugé idéal pour mener des recherches écologiques à long terme, d'une durée d'au moins 50 ans. Les recherches menées ici contribuent à toute une série de programmes internationaux, dont de nombreuses études sur le pergélisol. Aujourd'hui, comme partout ailleurs dans l'Arctique, la station de recherche elle-même est menacée. L'érosion liée au dégel du pergélisol le long d'une rive voisine s'est intensifiée. Aujourd'hui, loin d'atteindre une longévité prévue initialement de cinquante ans, certains bâtiments devront peut-être se voir déplacés ou reconstruits rapidement pour éviter qu'ils ne s'effondrent.

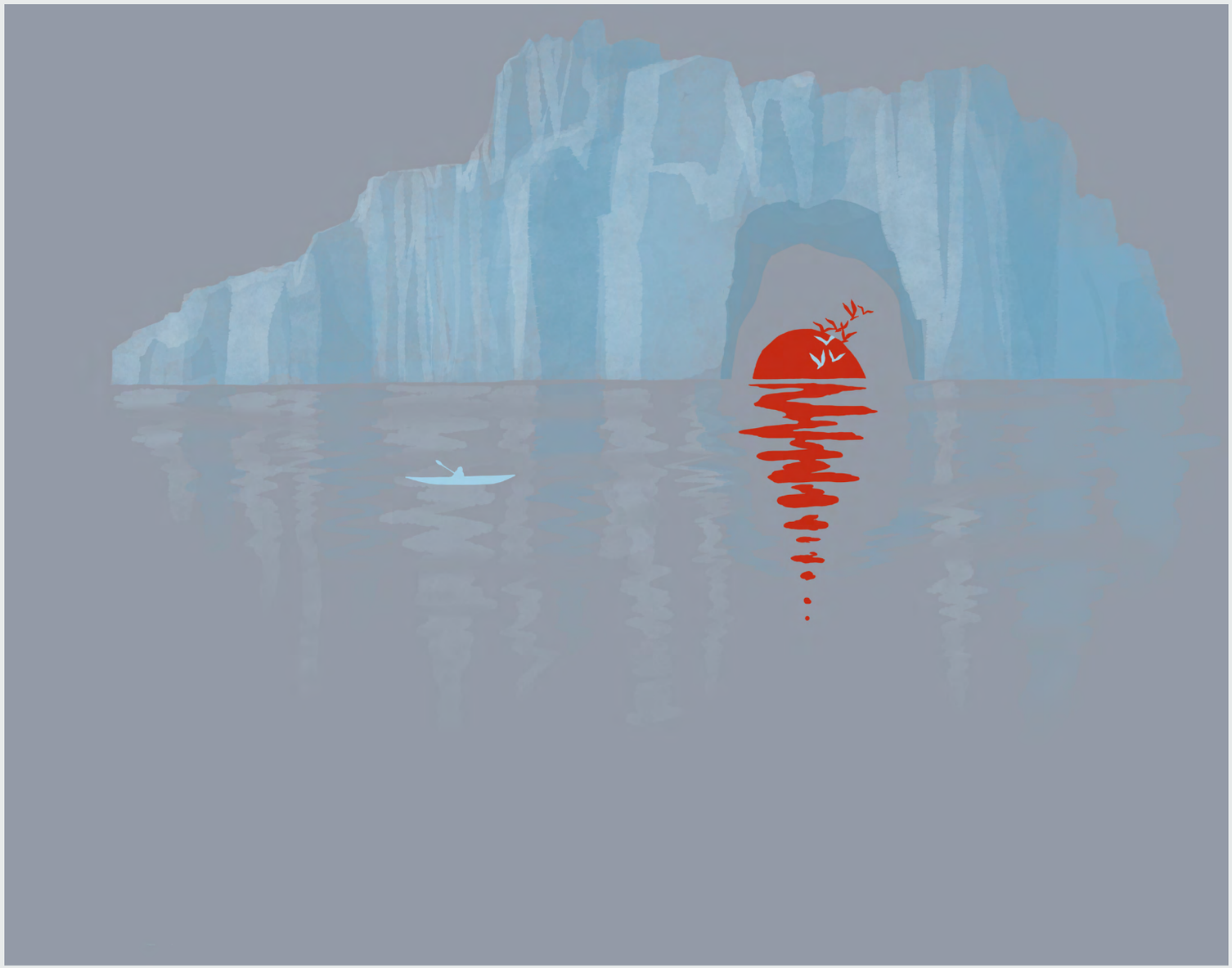
L'archipel du Svalbard fait partie de la Norvège, mais à bien des égards, il en est très éloigné. Situé à mi-chemin entre la Norvège continentale et le pôle Nord, cet archipel isolé était largement sous-peuplé jusqu'à ce que les premières colonies – de petits avant-postes – commencent à apparaître dans les années 1600. Aujourd'hui, moins de 3 000 personnes vivent au Svalbard. Comme le Kalaallit Nunaat, le Svalbard est également un site important pour la recherche sur le pergélisol dans la région nordique de l'Arctique. L'épaisseur du pergélisol au Svalbard varie de moins de 100 mètres dans les basses terres à plus de 500 mètres dans les hautes montagnes. Le Svalbard fait l'objet d'une surveillance intensive du pergélisol, et des observations à long terme de l'épaisseur de la couche active et du régime thermique du sol pergélisolé sont incluses dans le projet Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System.

Le pergélisol du Svalbard joue également un rôle essentiel dans la protection de l'approvisionnement alimentaire mondial. La Réserve mondiale de semences du Svalbard est construite dans le pergélisol à flanc de montagne. Elle permet le stockage à long terme de semences provenant du monde entier, sauvegardant ainsi la diversité génétique des plantes en cas de maladie ou d'autre catastrophe. Plutôt qu'un obstacle, le pergélisol a été considéré comme un avantage supplémentaire du site, car il contribuerait à la conservation des semences.

Bien que le pergélisol soit nettement moins présent dans le sud de la Norvège, il existe dans les pentes abruptes du substrat rocheux, y compris à des altitudes plus basses sur les pentes orientées vers le nord. Cette région a fait l'objet d'études scientifiques plus approfondies ces dernières années en raison de la fréquence accrue des chutes de pierres et des chutes de séracs pendant les étés chauds. Ces événements peuvent mettre en danger les personnes et les infrastructures, soit par un impact direct, soit par des événements associés tels que les inondations.



SOURCES: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY AND EASY VIEW CARTOGRAPHIC, INC. (2019); OBU *ET AL.* (2019); RAMAGE *ET AL.* (2021). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



© Olga Borjon-Privé (Oluko)

PORTRAIT LE MAIRE DE LA MUNICIPALITÉ D'AVANNAATA, KALAALLIT NUNAAT (GROENLAND)

Palle Jerimiassen

Pour le dire clairement, j'adore mon travail de maire ! Lorsque je me rends au travail le matin, je ne sais pas ce que la journée va m'apporter. C'est toujours différent, et de nouveaux défis apparaissent chaque jour. La majeure partie du travail se déroule devant l'ordinateur, pour préparer des rapports, des plans d'avenir et de nombreuses réunions avec différentes personnes. J'ai des réunions autour d'un café avec le secteur économique et des réunions autour d'un soda avec des jeunes. En politique, il faut s'efforcer de réunir des opinions différentes. C'est un domaine dans lequel j'aime travailler et pour lequel je pense être doué.

Avannaata est une vaste municipalité, la plus grande du monde, avec 21 villages et quatre villes, et il est important que je sois en contact avec l'ensemble de la population. Il y a des différences culturelles assez importantes au sein de la municipalité. Ilulissat est une ville multiethnique de 5 000 habitants, composée de 30 à 40 groupes ethniques différents. Dans les parties les plus septentrionales, dans le district de Qaanaaq, il existe encore des communautés qui vivent essentiellement de la chasse. Le dernier village à bénéficier d'un approvisionnement public en électricité est desservi depuis 2 ans. Il y a donc de grandes différences dans la façon dont nous vivons au sein de la municipalité, et je dois toujours penser à la façon dont les décisions que nous prenons ici à Ilulissat ont un impact sur les habitants des autres communautés. Tout est lié, et c'est en partie ce qui rend les choses intéressantes.

Il y a 20 ans, des scientifiques sont venus ici et ont dit que dans 10 ans, il n'y aurait plus de glace devant Ilulissat, mais personne ne les a crus, et moi non plus. Je suis désormais convaincu que le changement climatique s'est installé pour de bon. Je sais que les pêcheurs et les chasseurs sont très préoccupés par l'évolution du climat, les prévisions météorologiques imprévisibles et les changements qui se produisent dans la migration des animaux. C'est un sujet dont nous parlons tous quotidiennement, étant donné que nos vies dépendent entièrement de notre environnement.

En ce qui concerne les infrastructures, de nombreuses personnes se plaignent de l'état des routes, du fait que leurs maisons se déforment et que les canalisations des eaux usées fuient. Le changement climatique et la fonte du pergélisol nous posent des problèmes de plus en plus importants. Les endroits où les routes sont construites sur le pergélisol ressemblent aux petites montagnes russes des jardins de Tivoli. La terre autour des maisons s'enfonce et endommage leurs structures. Qaanaaq, par exemple, est construit sur un terrain où toute la zone a commencé à bouger. Cela signifie que tout devient tordu. Nous avons également eu des problèmes avec le système d'égouts souterrains. Regardez l'ancien terrain de football où les eaux usées ont commencé à s'écouler !

Nous devons prendre en compte le changement climatique, c'est indispensable, surtout dans le Nord où le mode de vie est complètement bouleversé. Nous avons fait des objectifs de développement durable des Nations unies le point de départ de la stratégie de développement de la municipalité. Nous avons également pris en compte le pergélisol dans tous nos plans. Dans certains endroits, les nouvelles maisons devront être construites sur le socle rocheux. C'est difficile dans des endroits comme Qaanaaq, où il n'y a pas beaucoup d'endroits appropriés. Nous avons commencé par construire une route reliant Ilulissat au nouvel aéroport, mais nous avons eu des difficultés à déterminer où placer la route sur un sol solide. À l'avenir, nous devrons développer le système d'égouts en surface dans les endroits où il y a du pergélisol, afin d'éviter des problèmes comparables à ceux que nous connaissons actuellement en ville.

Nous recevons beaucoup de visites de toutes sortes de personnes. Nous leur disons que nous devons tous prendre nos responsabilités. Nous sommes les plus touchés, mais même si nous ne sommes qu'une petite partie du monde, nous devons aussi prendre nos responsabilités pour réduire le changement climatique.



© Katie Orlinsky

L’éveil du géant

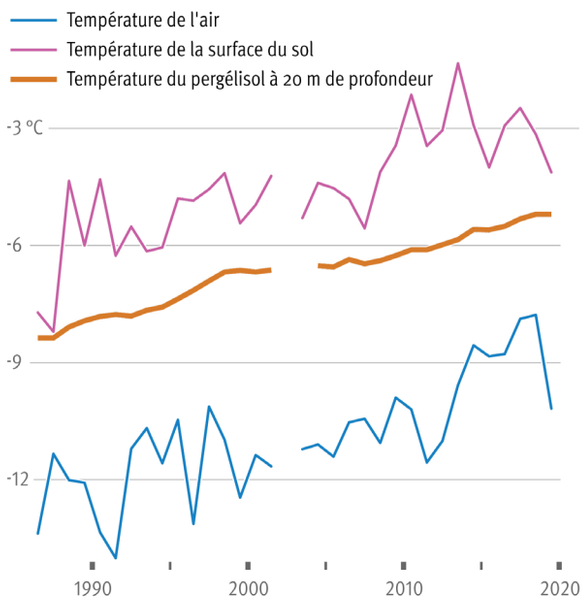
Le pergélisol et le changement climatique

Réchauffement en hausse, refroidissement en baisse

Augmentation des températures du sol

Le pergélisol est défini en fonction de la température : il s'agit d'un sol qui reste à une température égale ou inférieure à 0 °C pendant au moins deux années consécutives. Ainsi, le pergélisol n'est pas permanent. Les changements dans l'environnement, qu'ils soient naturels ou causés par l'homme ou anthropogéniques, peuvent entraîner une augmentation de la température du sol au-dessus de 0 °C, ce qui provoque le dégel du pergélisol. Selon l'ampleur du réchauffement, la fonte du pergélisol peut entraîner d'autres effets environnementaux, notamment des modifications du paysage et la libération de gaz à effet de serre.

Températures à Deadhorse, Alaska
Valeurs annuelles moyennes (°C) de 1987 à 2020



SOURCE: ROMANOVSKY, V. (2021). ADAPTED PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

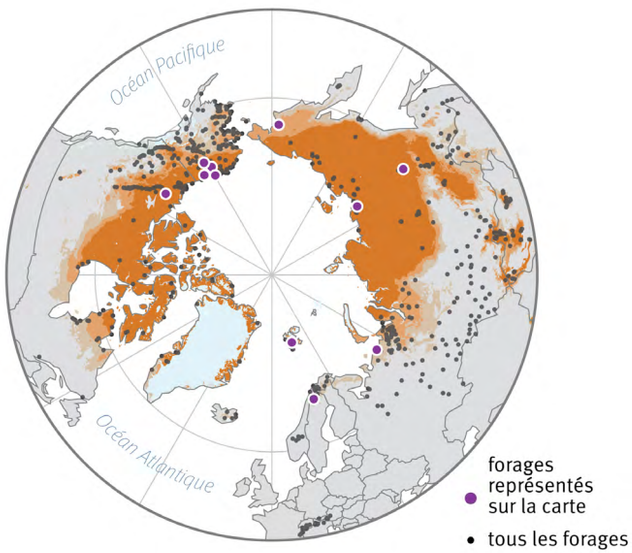
La température du pergélisol est liée à la température de la surface du sol, elle-même liée aux variations de la température de l'air et à la dynamique de la couverture neigeuse. Lorsque la température de la surface du pergélisol (c'est-à-dire le sol situé sous la couche active dégelée de façon saisonnière) augmente, elle conduit la chaleur vers le pergélisol plus profond, ce qui entraîne également un réchauffement en profondeur. Les scientifiques surveillent les variations de température dans le pergélisol au moyen de capteurs installés dans des trous forés dans le sol. Ces trous peuvent avoir une profondeur de quelques mètres dans le pergélisol chaud ou de plus de 20 mètres dans le pergélisol froid et le substratum rocheux. La surveillance à long terme des températures des trous de forage montre que le réchauffement du pergélisol est largement répandu dans tout l'Arctique en réponse au changement climatique mondial, avec des augmentations spectaculaires à certains endroits.

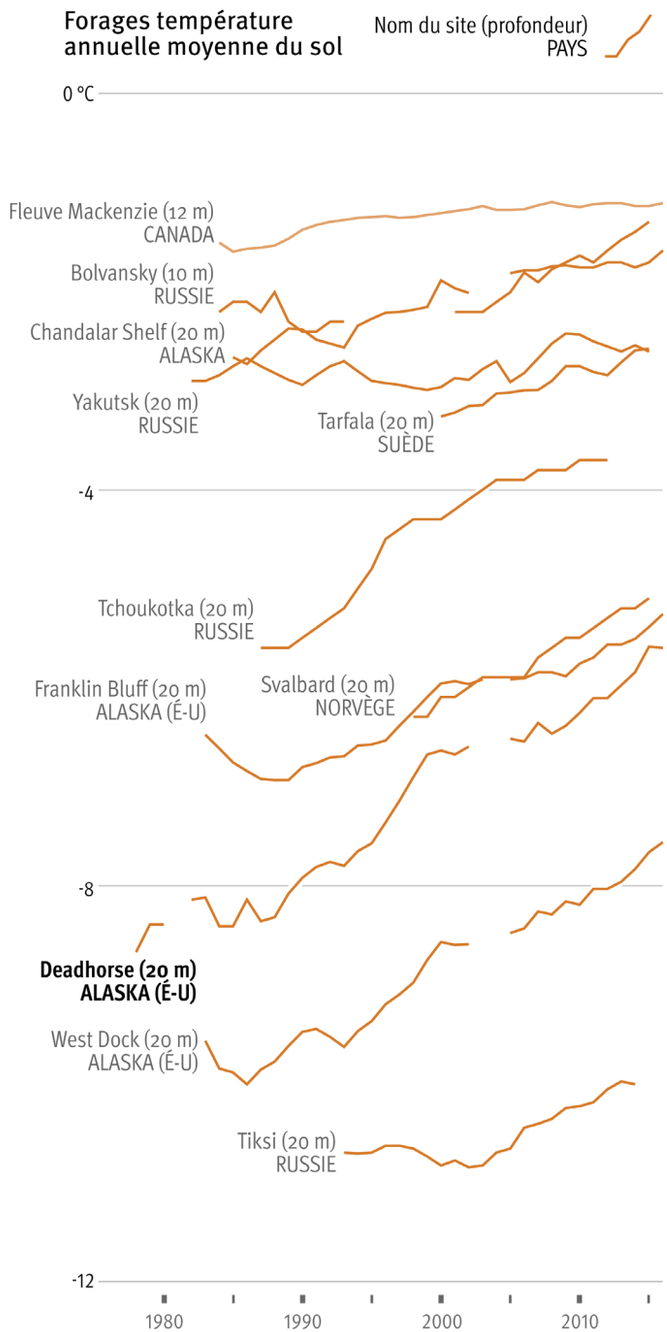
Au cours de l'Année polaire internationale (API) 2007-2009, des mesures de la température du sol ont été effectuées dans 575 sites de l'Arctique circumpolaire. Bien qu'il existe déjà des enregistrements de longue durée à certains endroits, l'initiative de l'API a permis d'ajouter de nombreux sites de surveillance inédits, afin de disposer d'un réseau plus complet dans de nombreuses régions pergélisolées. Collectivement, ces sites constituent une base de référence importante pour mesurer l'évolution du pergélisol dans l'Arctique.

Les mesures effectuées depuis la période de référence de l'API montrent que les températures moyennes annuelles du pergélisol augmentent dans la plupart des sites de l'Arctique. Entre 2007 et 2016, la température du sol dans la zone de pergélisol continu a augmenté de 0,39 °C en moyenne. La plus forte augmentation de température dans les forages individuels dans le pergélisol continu a été enregistrée à Marre Sale sur la péninsule de Yamal dans le nord-ouest de la Sibérie (+0,93 °C à une profondeur de 10 mètres) et sur l'île de Samoylov dans le delta du fleuve Lena dans le nord-est de la Sibérie (+0,95 °C à une profondeur de 20,75 mètres). Dans la zone de pergélisol discontinu, on a constaté que la température du sol avait augmenté de 0,2 °C avec la plus forte augmentation à Magadan à l'extrême est de la Sibérie (+0,95 °C à une profondeur de dix mètres).

Le pergélisol peut être qualifié de froid ou de chaud, en fonction de sa température en profondeur, qui varie lentement d'une année à l'autre. Lorsque le pergélisol froid, dont la température est inférieure à -1 °C, est chauffé, il subit un réchauffement notable. À l'inverse, le pergélisol chaud désigne le pergélisol dont la température est proche de 0 °C. Dans ce type de pergélisol, la présence de glace souterraine agit comme un tampon contre le réchauffement en absorbant la chaleur et en fondant. Cependant, une fois que la glace de sol a complètement fondu, le sol se réchauffe et n'est plus un pergélisol. Les régions montagneuses d'Europe, ainsi que l'Asie centrale et les Andes, ont tendance à avoir un pergélisol chaud qui contient moins de glace.

Le taux de réchauffement du pergélisol n'est pas uniforme dans l'Arctique et varie en fonction des conditions environnementales locales telles que le climat, la couverture neigeuse, la glace de sol, la végétation et





l'épaisseur de la couche organique. Les changements les plus importants ont été observés dans le pergélisol froid de l'Arctique et de l'Extrême-Arctique, où le réchauffement peut atteindre 1 °C par décennie. Bien qu'il y ait également eu des augmentations de température dans le pergélisol chaud, celles-ci ont été plus faibles, généralement inférieures à 0,3 °C par décennie.

Le réchauffement du pergélisol suscite une inquiétude mondiale quant au risque de libération de grandes quantités de gaz à effet de serre. Les sols du pergélisol contiennent de grandes quantités de matière organique. Lorsqu'ils dégèlent, ces matériaux sont exposés à la décomposition microbienne, ce qui produit du dioxyde de carbone, du méthane ou de l'oxyde nitreux. Les projections actuelles suggèrent que la libération combinée de dioxyde de carbone et de méthane due au dégel du pergélisol équivaudra à 100 à 200 milliards de tonnes de dioxyde de carbone d'ici 2100. À titre de comparaison, les émissions nettes mondiales de gaz à effet de serre d'origine anthropique étaient équivalentes à environ 59 milliards de tonnes de dioxyde de carbone en 2019. La contribution supplémentaire du pergélisol rendra encore plus difficile la limitation du réchauffement climatique à 1,5 °C, comme le prévoit l'Accord de Paris de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. Le réchauffement du pergélisol peut également entraîner des modifications du paysage, tels que l'érosion et les glissements de terrain, qui ont un impact sur les écosystèmes naturels, les modes de vie traditionnels (par exemple, la chasse et la pêche) et les infrastructures construites.

SOURCE : BISKABORN ET AL. (2019). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Coup de chaud

Épaississement de la couche active

La couche active est le sol au-dessus du pergélisol qui dégèle chaque été et regèle avec le retour de températures plus basses en automne. La profondeur du dégel de la couche active dépend des conditions locales ; elle a tendance à être plus fine dans le haut Arctique, plus froid, et plus épaisse dans la partie méridionale du pergélisol, où les températures sont plus élevées. Le dégel saisonnier de la couche active est très important pour l'écologie de l'Arctique, car c'est là que se déroulent d'importants processus biogéochimiques. Parce qu'elle est plus sensible aux variations climatiques à court terme, la profondeur de la couche active peut varier considérablement d'une année à l'autre. Cependant, les tendances à long terme de l'épaisseur de la couche active sont, avec la température du pergélisol elle-même, un indicateur important de l'évolution de l'état thermique du pergélisol.

L'épaisseur de la couche active est surveillée sur de nombreux sites de l'Arctique depuis les années 1990. Elle est le plus souvent mesurée à l'aide d'une sonde dans la couche active, un instrument qui peut être enfoncé dans les sédiments non gelés jusqu'à ce qu'il atteigne la table de gel. L'épaisseur de la couche active étant fortement influencée par la couverture neigeuse saisonnière et les températures de l'air, il peut être plus difficile de discerner des tendances dans l'épaisseur de la couche active que dans la température du pergélisol. Lorsque des séries de données plus profondes sont disponibles, les observations montrent généralement une augmentation de l'épaisseur de la couche active.

Le programme de de surveillance de la couche active circumpolaire suit depuis 1991 l'évolution de la couche active et du pergélisol proche de la surface. Les plus fortes augmentations de l'épaisseur de la couche active ont été observées en Sibérie occidentale et dans la région nord-européenne de la Russie, où l'épaisseur a augmenté de 0,4 mètre entre 2009 et 2019. Une tendance similaire a été observée sur des sites en Scandinavie, au Svalbard et au Kalaallit Nunaat (Groenland), bien qu'avec une plus grande variation annuelle. En Amérique du Nord, les changements les plus importants ont été enregistrés dans les terres intérieures de l'Alaska, où l'épaisseur de la couche active a augmenté de plus de 0,2 mètre entre 1996 et 2019. Sur le versant nord de l'Alaska, dans la vallée du fleuve Mackenzie au Canada et dans l'est de l'Arctique canadien, l'épaisseur de la couche active a connu à la fois des augmentations et des diminutions, mais les mesures actuelles restent similaires à celles des années 1990.

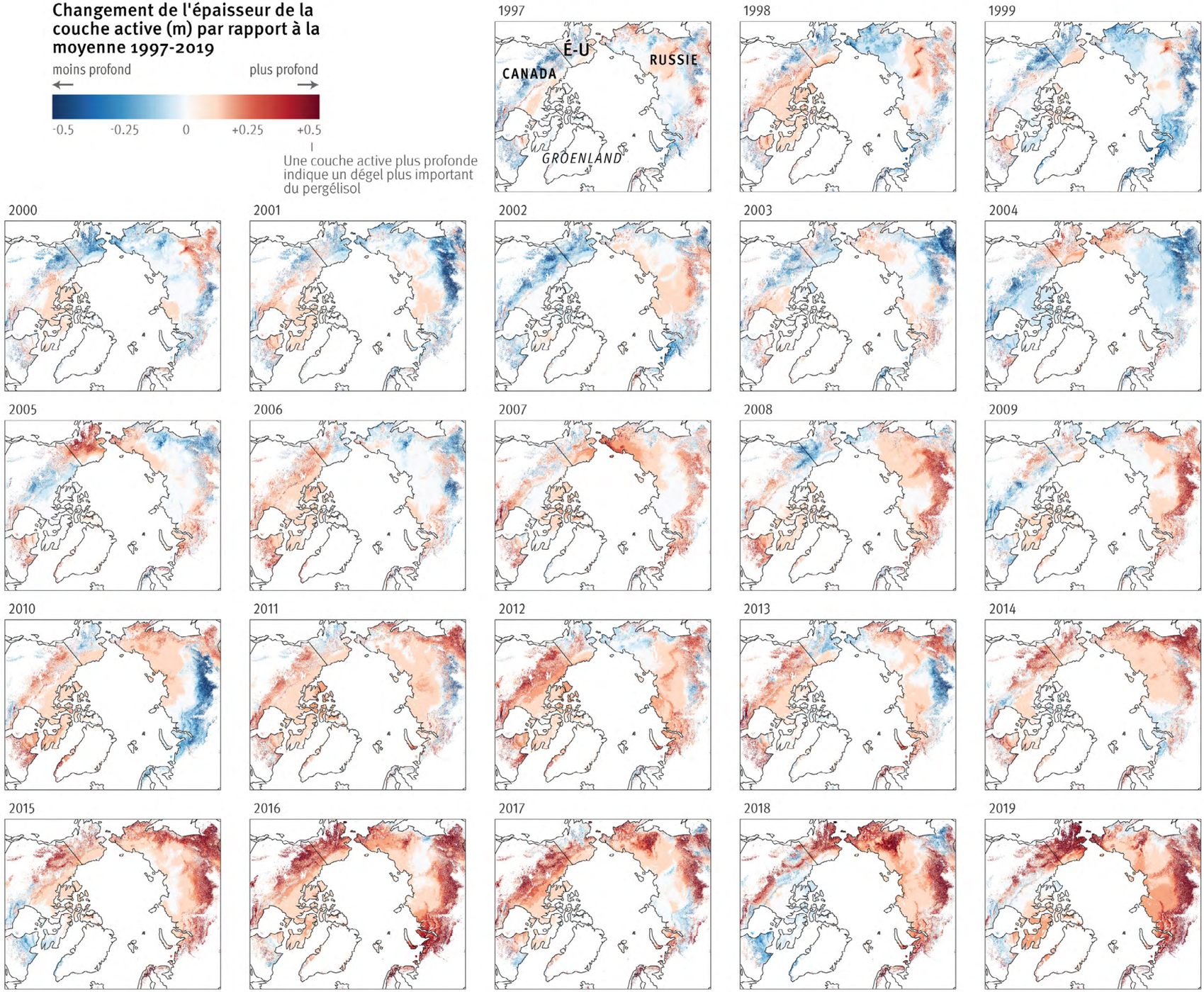
Des difficultés ont été identifiées dans l'interprétation des tendances d'évolution du pergélisol à partir des mesures de la température du sol et de l'épaisseur de la couche active. L'épaisseur de la couche active est généralement mesurée en utilisant la surface du sol comme point de référence. Cependant, le dégel dans les zones riches en glace peut entraîner un affaissement du sol et un abaissement de la nappe de pergélisol, et si l'élévation de la surface du sol n'est pas également surveillée, l'approfondissement de la couche active est sous-estimé. Les résultats peuvent également être influencés par la période de l'année à laquelle les mesures sont prises, en particulier si elles sont prises au moment du dégel maximal ou non, ce qui peut varier d'une année à l'autre.

Changement de l'épaisseur de la couche active (m) par rapport à la moyenne 1997-2019

moins profond ← → plus profond

-0.5 -0.25 0 +0.25 +0.5

Une couche active plus profonde indique un dégel plus important du pergélisol

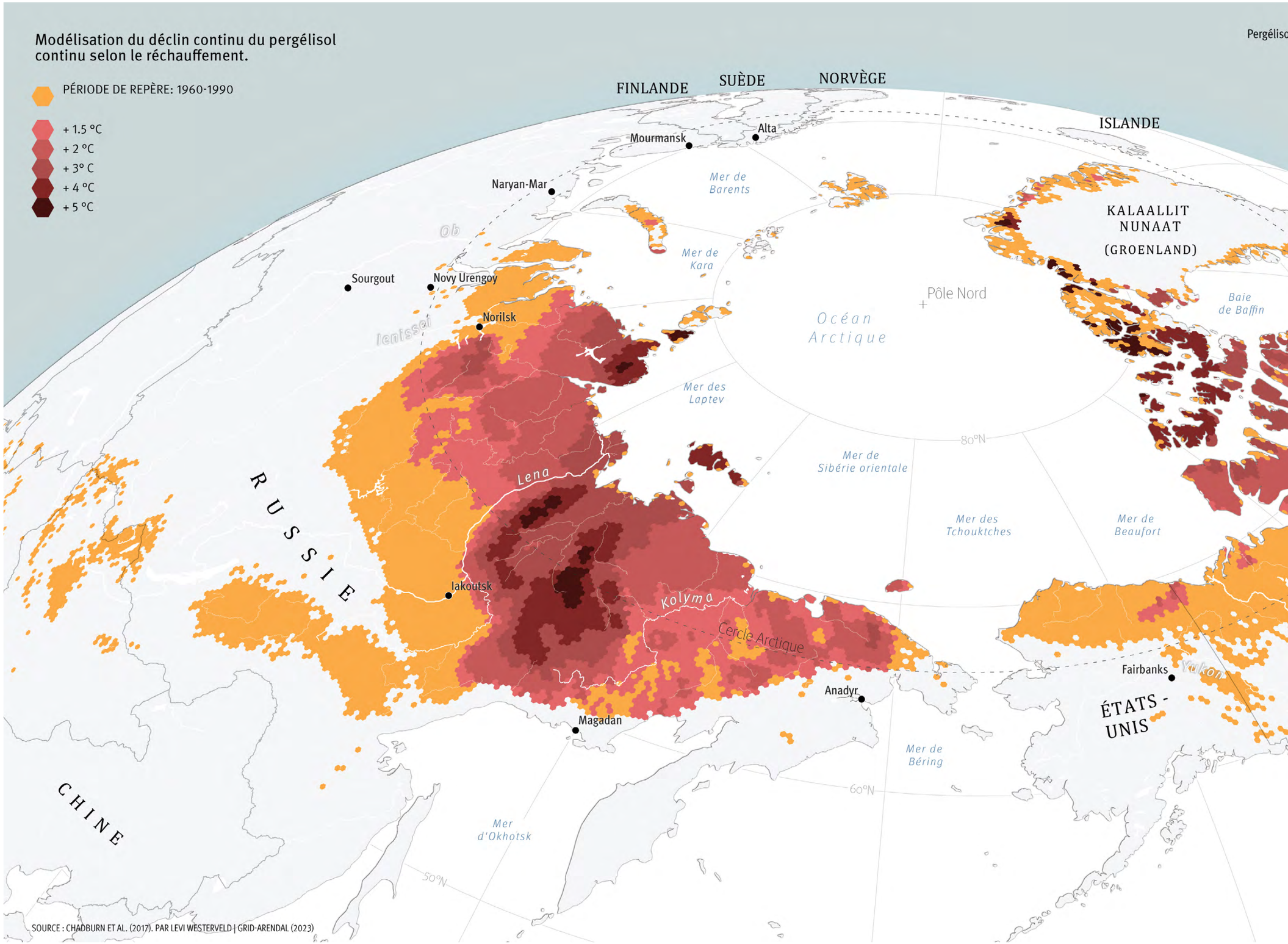


SOURCE : OBU ET AL. (2021). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

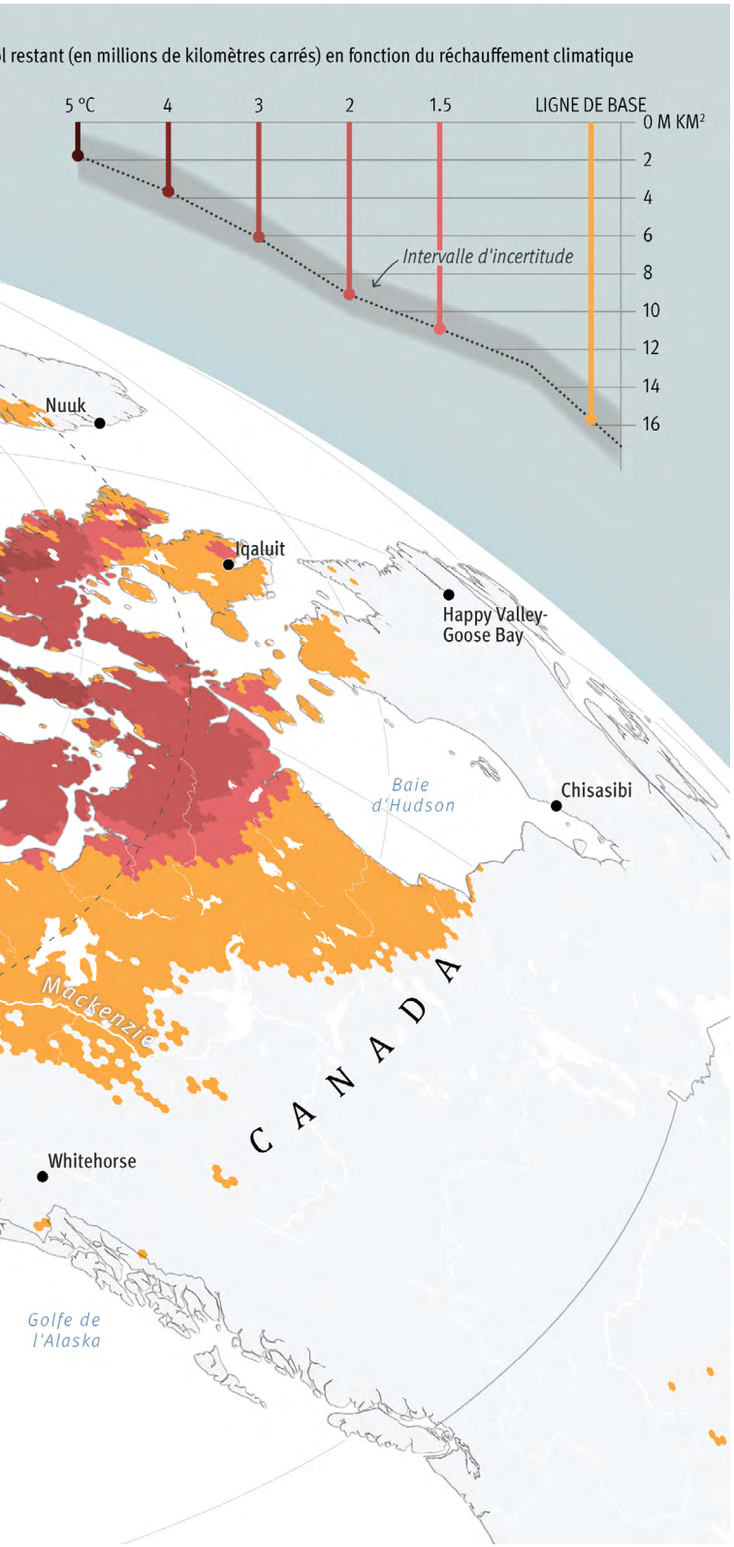
Modélisation du déclin continu du pergélisol continu selon le réchauffement.

PÉRIODE DE REPÈRE: 1960-1990

+ 1.5 °C
+ 2 °C
+ 3° C
+ 4 °C
+ 5 °C



SOURCE : CHADBURN ET AL. (2017). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



En voie de disparition

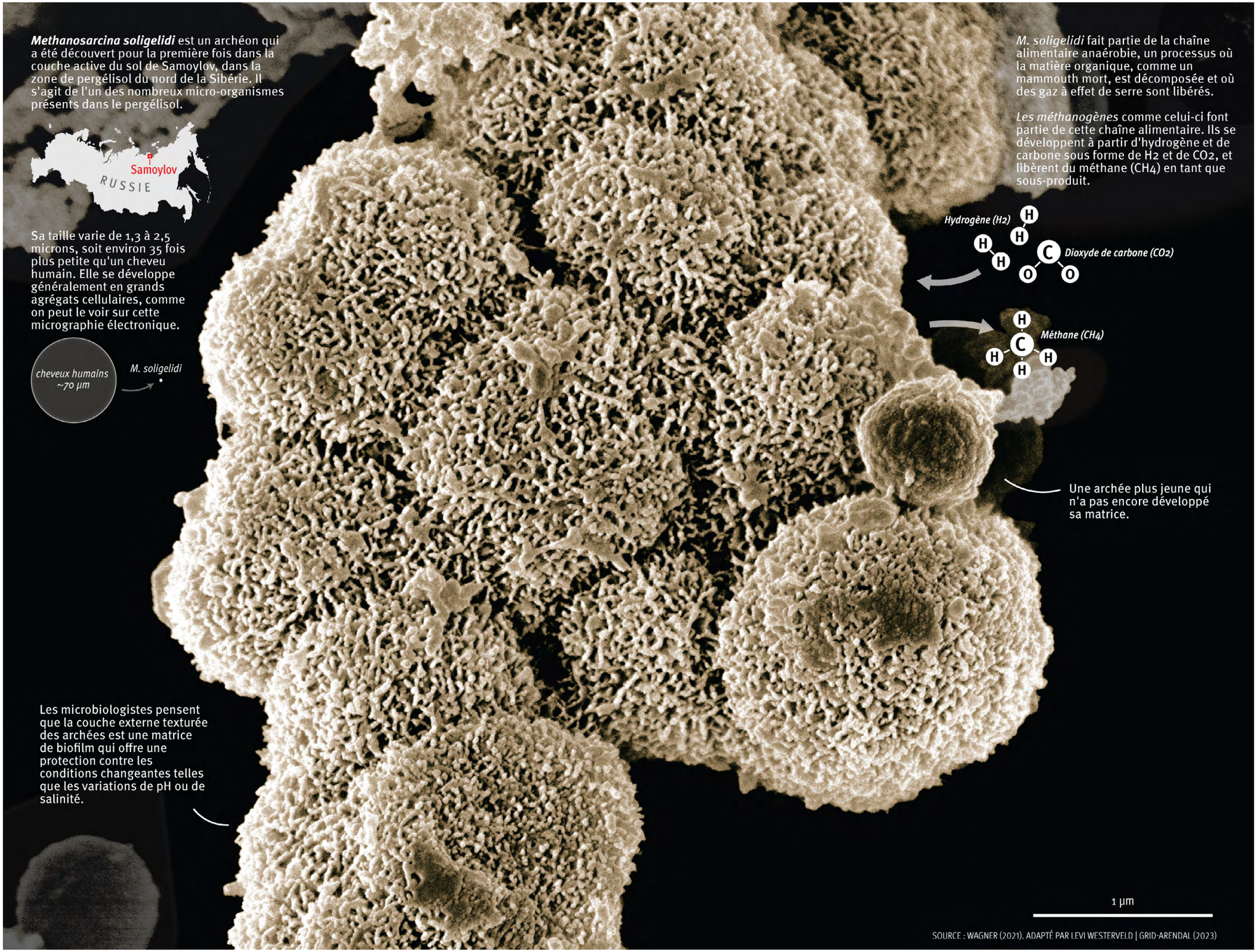
Diminution de l'étendue du pergélisol

Le pergélisol terrestre couvre environ 14 millions de km² des terres exposées de l'hémisphère nord. La fonte du pergélisol peut avoir des répercussions importantes sur les écosystèmes terrestres, les processus paysagers, le cycle hydrologique, les émissions de gaz à effet de serre et les infrastructures humaines. La sensibilité du pergélisol au réchauffement climatique et la possibilité de changements environnementaux à grande échelle font qu'il est important de comprendre toute l'étendue des évolutions prévues du pergélisol. Tous les modèles climatiques les plus récents montrent que le réchauffement continu entraîne le dégel du pergélisol, mais la quantité de pergélisol susceptible d'être perdue varie considérablement selon les différents modèles du système terrestre, en raison du manque de données et des limites inhérentes à ces modélisationss. On considère généralement qu'il y a perte de pergélisol lorsque la couche active ne regèle pas complètement en hiver. Cela signifie que le dégel complet du pergélisol jusqu'à des centaines de mètres peut prendre beaucoup plus de temps.

Une approche permettant d'estimer la perte future de pergélisol dans différents scénarios de réchauffement consiste à examiner la relation entre la température moyenne annuelle de l'air et la présence de pergélisol.

Une étude a estimé que si le climat est stabilisé à 1,5 °C au-dessus des niveaux préindustriels, entre 2,6 et 6,8 millions de km² (plus de 30 %) de la superficie actuelle du pergélisol proche de la surface pourraient être perdus. Si le climat se stabilise à 2 °C au-dessus des niveaux préindustriels, cette perte atteindrait entre 4,4 et 8,6 millions de km² (plus de 40 %) de la zone de pergélisol. Si le réchauffement s'accentue encore, une grande partie du pergélisol existant près de la surface dégèlera. Avec un réchauffement de 5 °C, l'étendue du pergélisol proche de la surface sera réduite à 0,3-3,1 millions de km², et avec 6 °C de réchauffement, il pourrait disparaître complètement.

La vitesse de dégradation du pergélisol n'est pas uniforme dans l'Arctique. Le pergélisol se dégrade le plus rapidement dans l'ouest de l'Arctique russe, où les températures annuelles moyennes du sol ont augmenté de 0,03 °C à 0,06 °C par an dans la zone de pergélisol continu et où la nappe de pergélisol s'est abaissée de huit mètres dans la zone de pergélisol discontinu. Entre 1997 et 2018, les scientifiques ont observé des signes distincts de dégradation du pergélisol dans cette région : une augmentation progressive de l'épaisseur de la couche active, une dégradation accrue du pergélisol après la fonte de la glace du sol et un abaissement de la nappe du pergélisol.



SOURCE : WAGNER (2021). ADAPTÉ PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Micro-organismes, macro-effets

Cycle du carbone dans le pergélisol

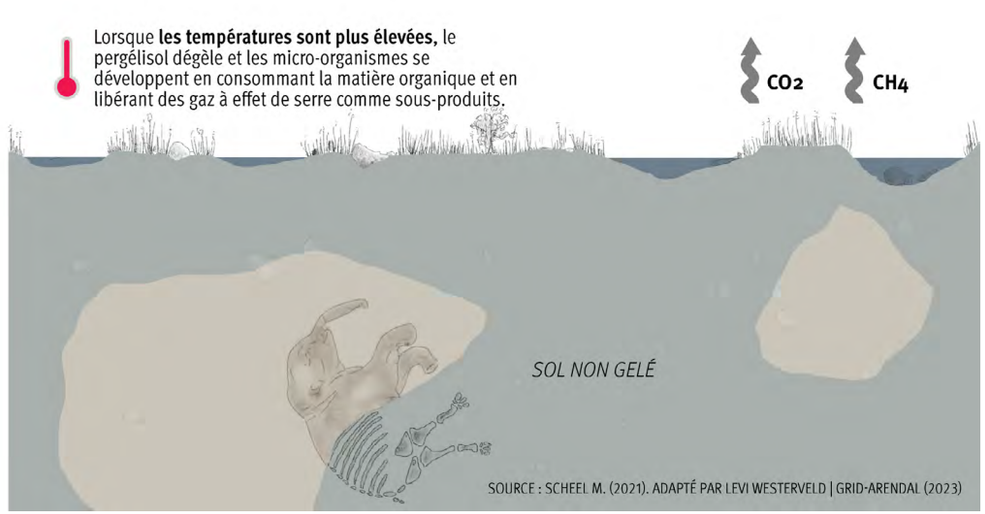
Le pergélisol contient de grandes quantités de carbone organique, le carbone que l'on trouve dans tous les organismes vivants et leurs restes. Le carbone organique du pergélisol est principalement constitué d'animaux et de plantes morts qui se sont accumulés et sont restés gelés pendant des milliers d'années. Lorsque les températures augmentent et que le pergélisol dégèle, cette matière organique commence à se décomposer et à libérer du dioxyde de carbone et du méthane dans l'atmosphère.

La majeure partie du carbone de la Terre est stockée dans les roches. Le reste se trouve dans l'atmosphère, les sols, les océans et les organismes vivants, et traverse ces réservoirs dans le cadre d'un processus connu sous le nom de cycle global du carbone. Dans le sous-cycle du pergélisol, le carbone est transféré du sol à la végétation et aux microbes, libéré dans l'atmosphère, retransféré à la végétation par le biais de la photosynthèse et enfin renvoyé dans le sol où le processus recommence. Tant que le sol est gelé, la décomposition microbienne de la matière organique du sol est considérablement ralentie et le carbone peut s'accumuler. De nombreux micro-organismes sont capables de survivre à des températures glaciales, soit en ralentissant leur métabolisme, soit en entrant dans un état de repos. Lorsque le pergélisol dégèle, l'eau gelée dans le sol fond, rendant la matière organique accessible à la décomposition microbienne du sol. Bien qu'un groupe de micro-organismes, les méthanotrophes, soit capable de consommer du méthane (et constitue le seul puits de méthane connu), la plupart des processus qui se déroulent pendant le dégel du pergélisol augmentent la libération de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

La présence ou l'absence d'oxygène pendant la décomposition détermine si le carbone est libéré sous forme de dioxyde de carbone ou de méthane. Dans les sols aérobies, où de l'oxygène est disponible, tels que les sites effondrés et drainés, la décomposition du carbone organique libère davantage de dioxyde de carbone.

En revanche, la décomposition anaérobie dans des conditions limitées en oxygène et souvent gorgées d'eau (par exemple, dans les lacs de dégel du pergélisol) libère à la fois du dioxyde de carbone et du méthane. Bien que le dégel des sols du pergélisol permette un enracinement plus profond de la végétation et un piégeage plus important du carbone, cela ne permet pas de compenser les émissions de carbone de ces sols pendant leur dégel. En raison de la vulnérabilité potentielle des grandes réserves de carbone du pergélisol, leur dégradation revêt une importance mondiale. La conversion d'une partie, même minime, du carbone du pergélisol en gaz à effet de serre pourrait accélérer le rythme du changement climatique, entraînant un réchauffement supplémentaire du pergélisol et encore plus d'émissions de gaz à effet de serre dans une boucle de rétroaction positive.





Plus vite, plus profond, plus fort I

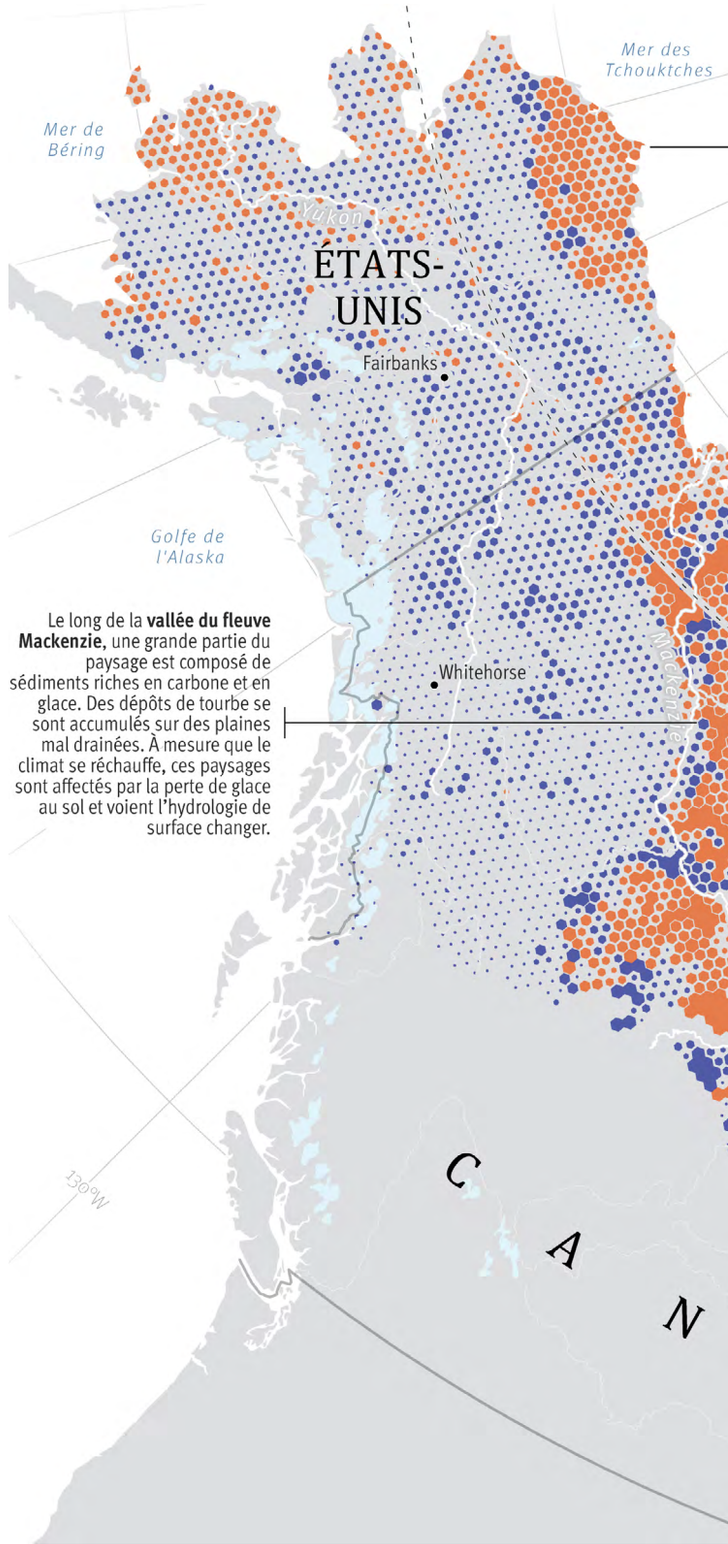
Vitesse du dégel en Amérique du Nord

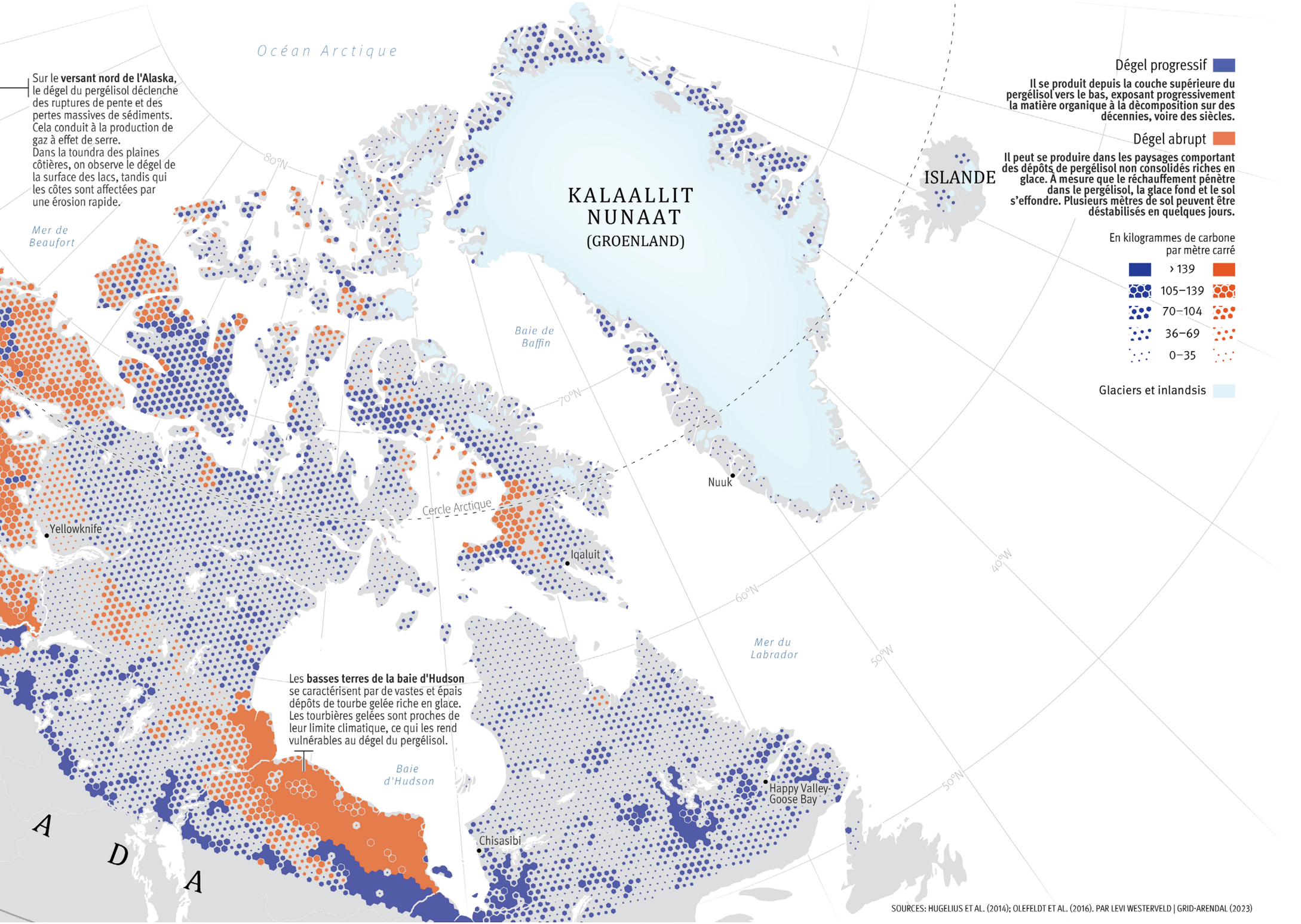
Les différents types de paysages de pergélisol réagissent différemment au réchauffement. Le dégel du pergélisol est souvent divisé en deux types principaux : le dégel progressif et le dégel abrupt. Le dégel progressif généralisé se produit à partir de la couche supérieure du pergélisol vers des couches de plus en plus profondes. La matière organique est ainsi exposée à la décomposition pendant des décennies, voire des siècles. Le dégel brutal se produit là où l'érosion a lieu le long des berges des rivières, des lacs et des côtes, ainsi que dans les sols contenant de grandes quantités de glace pure. La glace peut représenter une grande partie du volume du sol et cimenter le sol gelé. Lorsque le réchauffement pénètre dans le sol, le pergélisol s'effondre à mesure que la glace fond. Cet effondrement de la surface du sol (appelé thermokarst) accélère le dégel et, au lieu de dégeler quelques centimètres par an, plusieurs mètres de pergélisol peuvent être déstabilisés en l'espace de quelques jours ou de quelques semaines. Les modifications du paysage créent de nouveaux lacs, étangs, glissements de terrain et autres formes de relief.

Le long du versant nord de l'Alaska et au Canada, dans une zone qui s'étend de la côte septentrionale de la chaîne de Brooks à la mer de Beaufort, le paysage de la toundra est riche en glace de sol et en matière organique. Au pied des montagnes de la chaîne de Brooks et le long des vallées fluviales, la fonte du pergélisol riche en glace déclenche des ruptures de pente et des pertes massives de sédiments. Ce phénomène entraîne non seulement la production de gaz à effet de serre, car la matière organique gelée commence à dégeler et à se décomposer, mais libère également de grandes quantités de sédiments et de polluants dans les écosystèmes aquatiques. Sur les basses terres côtières, la dégradation de la toundra polygonale à coins de glace entraîne la formation de grands lacs de dégel ainsi qu'une érosion côtière rapide.

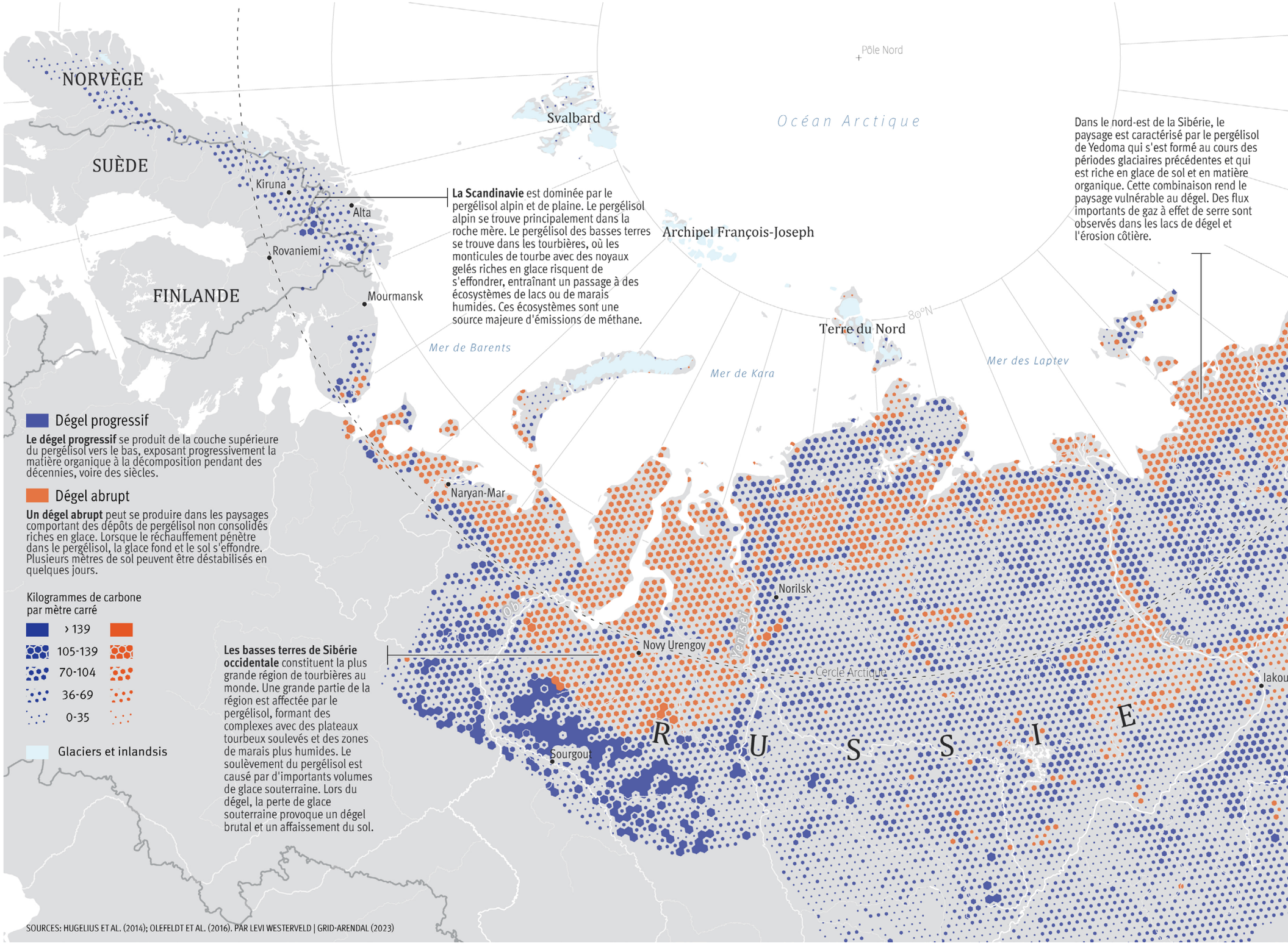
Un dégel rapide se produit également le long de la vallée du fleuve Mackenzie dans les Territoires du Nord-Ouest du Canada, où une grande partie du paysage est constituée d'épais sédiments riches en glace et en carbone. D'épais dépôts de tourbe se sont également accumulés sur les terrains plats et mal drainés. Avec le réchauffement climatique, ces paysages sont affectés par la perte de glace de sol, l'affaissement et les modifications de l'hydrologie de surface.

Les basses terres de l'ouest de la baie d'Hudson sont caractérisées par de vastes et profonds dépôts de tourbe qui se sont accumulés depuis le retrait de la dernière calotte glaciaire. Il s'agit des deuxièmes plus grands dépôts de tourbe au monde, après les basses terres de Sibérie occidentale. Une grande partie de la tourbe s'est accumulée dans un climat légèrement plus chaud pendant le maximum thermique de l'Holocène, mais lorsque le climat s'est refroidi il y a quelques milliers d'années, la couche active est devenue moins profonde et a transformé la tourbe de toute la région en un état gelé. Les tourbières gelées sont riches en glace souterraine et, comme elles sont proches des limites de leur zone climatique, elles sont vulnérables au dégel du pergélisol.

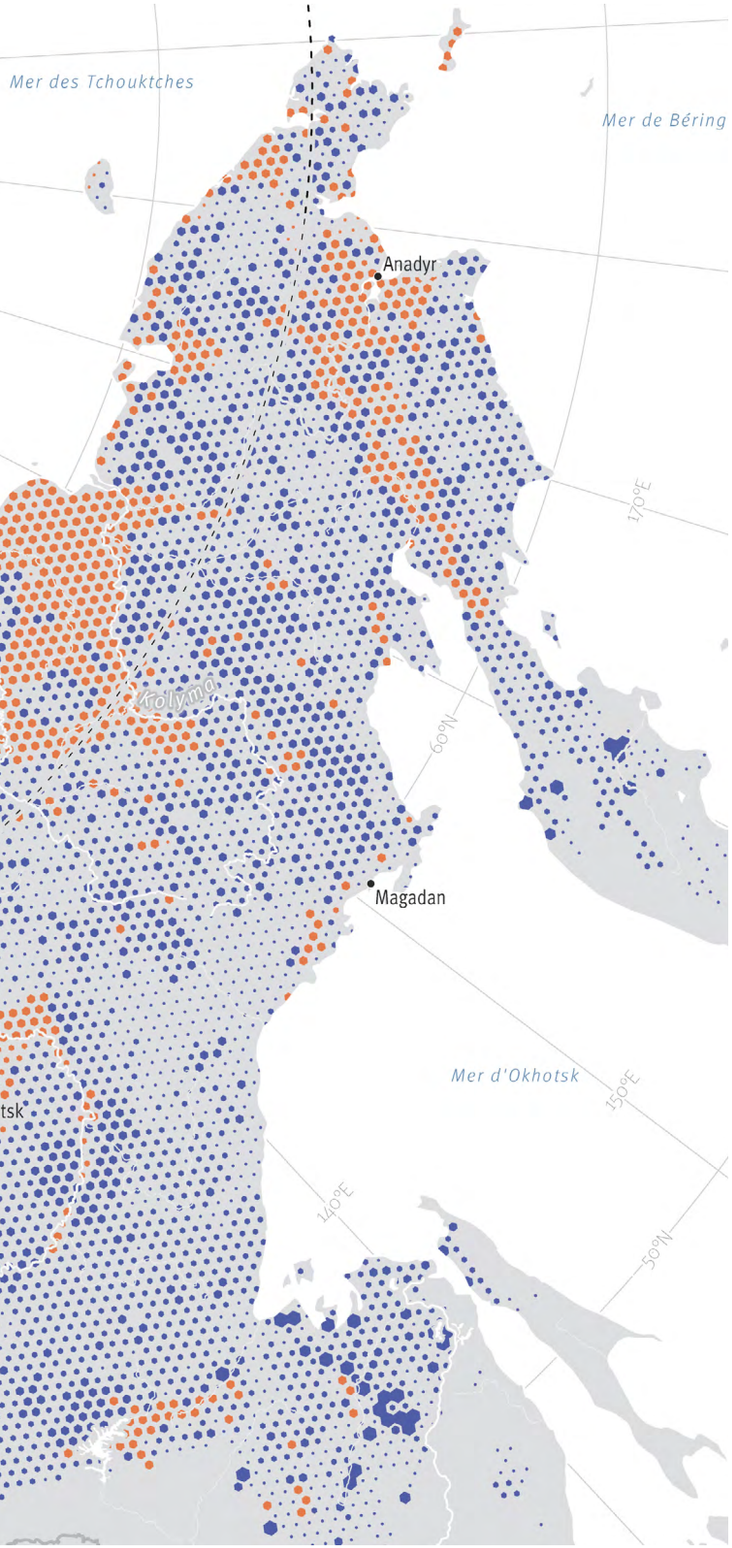




SOURCES: HUGELIUS ET AL. (2014); OLEFELDT ET AL. (2016). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



SOURCES: HUGELIUS ET AL. (2014); OLEFELDT ET AL. (2016). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



Plus vite, plus profond, plus fort II

Vitesse du dégel en Scandinavie et dans la Fédération de Russie

En Scandinavie (à l'exception du Svalbard), le pergélisol est dominé par deux types distincts : le pergélisol de montagne et le pergélisol de plaine. Le pergélisol de montagne se trouve principalement dans la roche mère et ne contient pas beaucoup de matière organique, ce qui signifie que les rétroactions climatiques sont limitées. Le dégel du pergélisol de montagne peut déstabiliser le terrain en provoquant des chutes de pierres, des glissements de terrain ou d'autres mouvements de masse. Le pergélisol de plaine se trouve sur des terrains relativement plats où la tourbe riche en glace et d'autres sédiments s'accumulent dans des polygones à coins de glace ainsi que dans des tourbières. Si le pergélisol dégèle et que la glace fond, ces paysages risquent de s'effondrer. Il en résulte un passage à des écosystèmes de lacs ou de tourbières humides, qui constituent une source majeure de méthane.

Le pergélisol est présent sur près de 65 % du territoire russe. Bien qu'il soit relativement limité dans la partie européenne de la Russie, il est très étendu en Sibérie. Les basses terres de Sibérie occidentale, qui ont commencé à se développer il y a 10 000 à 11 000 ans, constituent la plus grande région de tourbières au monde. Une grande partie de la région est affectée par le pergélisol, formant des complexes avec des plateaux tourbeux soulevés et des zones de tourbières plus humides. Le soulèvement du pergélisol est causé par d'importants volumes de glace souterraine. Lors du dégel, la perte de glace souterraine provoque un dégel brutal et un affaissement du sol.

Le taux de dégradation du pergélisol dans l'ouest de l'Arctique russe est l'un des plus élevés au monde. En réponse à l'augmentation des températures et des précipitations depuis le milieu des années 1970, la température annuelle moyenne du sol est passée de 0,03 °C à 0,06 °C par an dans la zone continue. Les signes de dégradation du pergélisol sont évidents, notamment l'augmentation de l'épaisseur de la couche active et l'abaissement de la nappe de pergélisol (jusqu'à 8 mètres dans la zone discontinue). Le réchauffement du pergélisol est le plus rapide dans la toundra de l'ouest de la Russie (jusqu'à 0,06 °C par an) et le plus lent dans la taïga du nord (jusqu'à 0,04 °C par an).

Le paysage du nord-est de la Sibérie est caractérisé par le pergélisol de Yedoma, qui sont des dépôts du complexe glaciaire. Ces dépôts épais se sont formés au cours des précédentes périodes glaciaires et sont riches à la fois en glace souterraine et en matière organique. Des coins de glace massifs composent une grande partie du volume du sol (souvent plus de 50 %, et jusqu'à 90 %). La glace est riche en carbone. Cette combinaison de glace et de teneur en carbone rend le paysage extrêmement vulnérable au dégel, et de fortes émissions de gaz à effet de serre ont été mesurées dans les lacs de dégel et dans le pergélisol côtier en érosion.

Franchir le seuil

Scénarios futurs d'émission de carbone

Les modèles du système terrestre sont des outils utilisés pour quantifier la réponse du système climatique de la Terre aux émissions de gaz à effet de serre. Les modèles fournissent également un « budget » de la quantité de carbone qui peut être émise dans l'atmosphère avant qu'un seuil de réchauffement particulier ne soit franchi. Il est essentiel de comprendre comment le climat de la Terre évoluera en fonction de différents scénarios (ou niveaux d'émission), de manière à fixer des objectifs en matière d'émissions de gaz à effet de serre pour tenter de limiter l'augmentation de la température mondiale à 1,5 °C, comme le recommande l'Accord de Paris.

Le système climatique de la Terre est trop complexe pour que l'on puisse faire des projections avec un degré élevé de certitude. Les modèles du système terrestre n'incluent pas toutes les sources de carbone libérées dans l'atmosphère, et le calcul des émissions provenant de sources naturelles, telles que le pergélisol terrestre, présente un degré d'incertitude beaucoup plus élevé que celui des sources anthropiques, telles que l'activité industrielle. C'est pourquoi le GIEC n'a pas inclus les émissions provenant du pergélisol avant son sixième rapport d'évaluation. Les contributions du pergélisol sous-marin sont encore plus difficiles à modéliser en raison du manque de certaines données indispensables.

Le flux net de carbone est la différence entre le carbone absorbé par les plantes grâce à la photosynthèse et le carbone libéré dans l'atmosphère par des sources telles que la respiration et les changements d'affectation des sols. Au fur et à mesure que le pergélisol dégèle, une plus grande quantité de carbone stocké devient disponible pour être libérée dans l'atmosphère. Bien que l'absorption de carbone par les plantes augmente à mesure que le climat se réchauffe, la modélisation montre que la quantité de carbone libérée sera supérieure à celle qui peut être utilisée dans la production primaire. Les émissions de carbone les plus importantes se produiraient dans le cadre du scénario RCP (Representative Concentration Pathway) 8.5, le scénario d'émissions le plus élevé jusqu'en 2100. Un scénario d'émissions intermédiaires n'entraîne toutefois qu'une faible variation des émissions nettes, car l'augmentation des émissions due au dégel du pergélisol est compensée par une augmentation de l'absorption par la végétation.

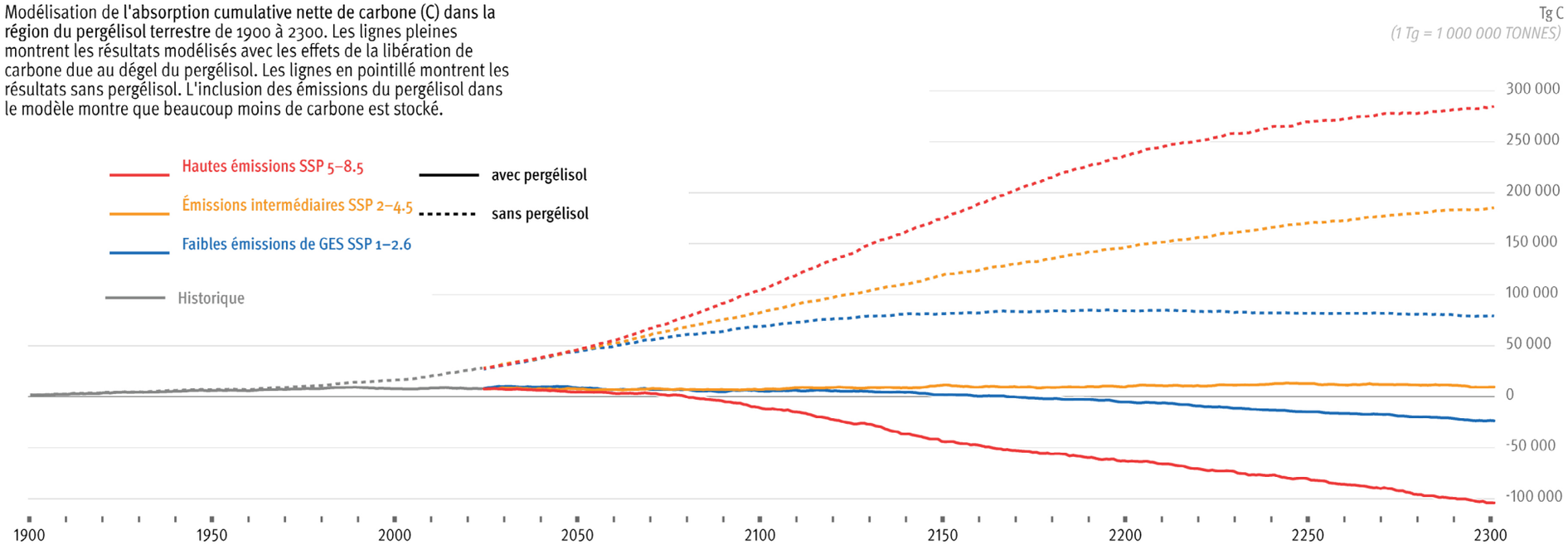
Selon le sixième rapport d'évaluation du GIEC, pour chaque degré de réchauffement de la planète, entre 3,1 et 41 milliards de tonnes de dioxyde de carbone seront émises par le pergélisol terrestre d'ici à 2100. Bien qu'une grande incertitude entoure l'ampleur des émissions, on s'accorde à dire que plus le réchauffement atmosphérique s'accentuera, plus le dégel du pergélisol émettra de carbone, contribuant ainsi à aggraver le réchauffement de la planète. Ces estimations ne tiennent pas compte des émissions dues au dégel brutal du pergélisol, un phénomène que les scientifiques commencent à peine à comprendre. Certaines estimations suggèrent que pour chaque degré de réchauffement, le dégel brutal produira presque deux fois plus d'émissions que le dégel progressif.

Selon les modèles actuels, le dégel du pergélisol sous-marin est similaire dans les différents scénarios climatiques. Jusqu'en 2100 environ, tous les scénarios montrent un dégel du pergélisol environ quatre fois plus rapide qu'avant le réchauffement climatique anthropique. Après 2100, la perte de pergélisol sous-marin se poursuit à des rythmes relativement similaires. Dans le scénario à fortes émissions, cependant, le pergélisol sous-marin commence à dégeler de façon spectaculaire, environ 15 à 18 fois plus vite qu'avant le réchauffement climatique anthropique. Le dégel rapide du pergélisol sous-marin est lié à la disparition de la glace de mer arctique, qui entraînera un réchauffement plus rapide des fonds marins sur les plateaux arctiques, accélérant ainsi le dégel du pergélisol. La réduction continue de la glace de mer est très probable, même dans le cadre de scénarios optimistes de réduction des émissions de carbone. Étant donné que la formation de la glace de mer entraîne la formation de saumure froide, qui refroidit les fonds marins, l'effet à long terme de la réduction de la glace de mer sera le réchauffement du pergélisol sous les zones peu profondes du plateau arctique.

Sur la base des connaissances limitées concernant la quantité et la qualité de la matière organique contenue dans le pergélisol sous-marin, les modèles suggèrent qu'au rythme actuel du réchauffement climatique, les microbes producteurs de méthane décomposeront plus de 400 millions de tonnes de carbone par an après l'an 2100. La majeure partie de cette décomposition du carbone produit du méthane sous le plancher océanique, soit plus de 200 millions de tonnes par an dans le cadre d'un scénario d'émissions élevées. Toutefois, il est difficile de prévoir la quantité de méthane qui atteindra finalement l'atmosphère. Dans les sédiments et la colonne d'eau au-dessus du pergélisol en cours de dégel, les microbes méthanotrophes peuvent oxyder le méthane remontant dans des conditions aérobies et anaérobies, et le transformer en dioxyde de carbone avant qu'il n'atteigne le fond de la mer et l'atmosphère. Le puits de méthane benthique est un filtre microbien extrêmement efficace pour le méthane ascendant et consomme généralement une grande partie du flux de méthane. Le total actuel des émissions de méthane de l'océan vers l'atmosphère est estimé à environ 4 à 10 millions de tonnes par an. Même dans les scénarios de changement climatique les plus extrêmes, la quantité maximale de méthane libérée par le dégel du pergélisol sous-marin ne serait que le double de ce qu'elle est aujourd'hui.

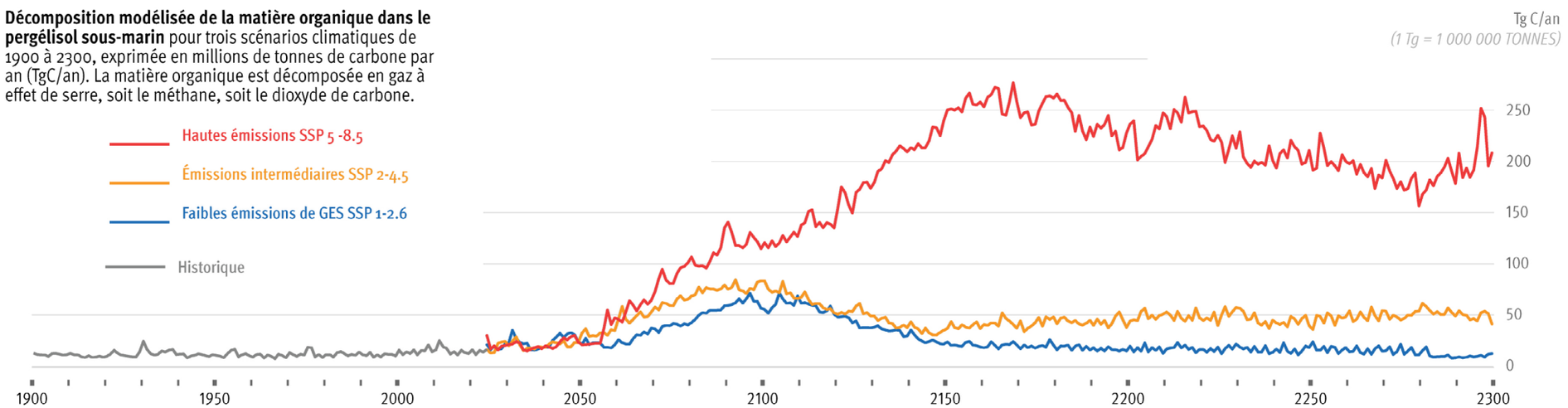
Même si la société atteint ses objectifs en matière d'émissions de carbone, les émissions provenant du pergélisol pourraient persister, et conduire à un dépassement de ces mêmes objectifs. En dégelant, le pergélisol ajoute des gaz à effet de serre à l'atmosphère, ce qui accentue le réchauffement et risque de dépasser les prévisions en la matière. Dans ce scénario, le carbone du pergélisol serait irréversiblement perdu, car la plupart des types de pergélisol ne se reconstituent pas rapidement ou facilement. Par conséquent, le dégel du pergélisol pourrait également déclencher une perte de carbone qui se poursuivrait pendant des siècles. Ces émissions futures provenant du pergélisol doivent être prises en compte dans la modélisation.

Modélisation de l'absorption cumulative nette de carbone (C) dans la région du pergélisol terrestre de 1900 à 2300. Les lignes pleines montrent les résultats modélisés avec les effets de la libération de carbone due au dégel du pergélisol. Les lignes en pointillé montrent les résultats sans pergélisol. L'inclusion des émissions du pergélisol dans le modèle montre que beaucoup moins de carbone est stocké.

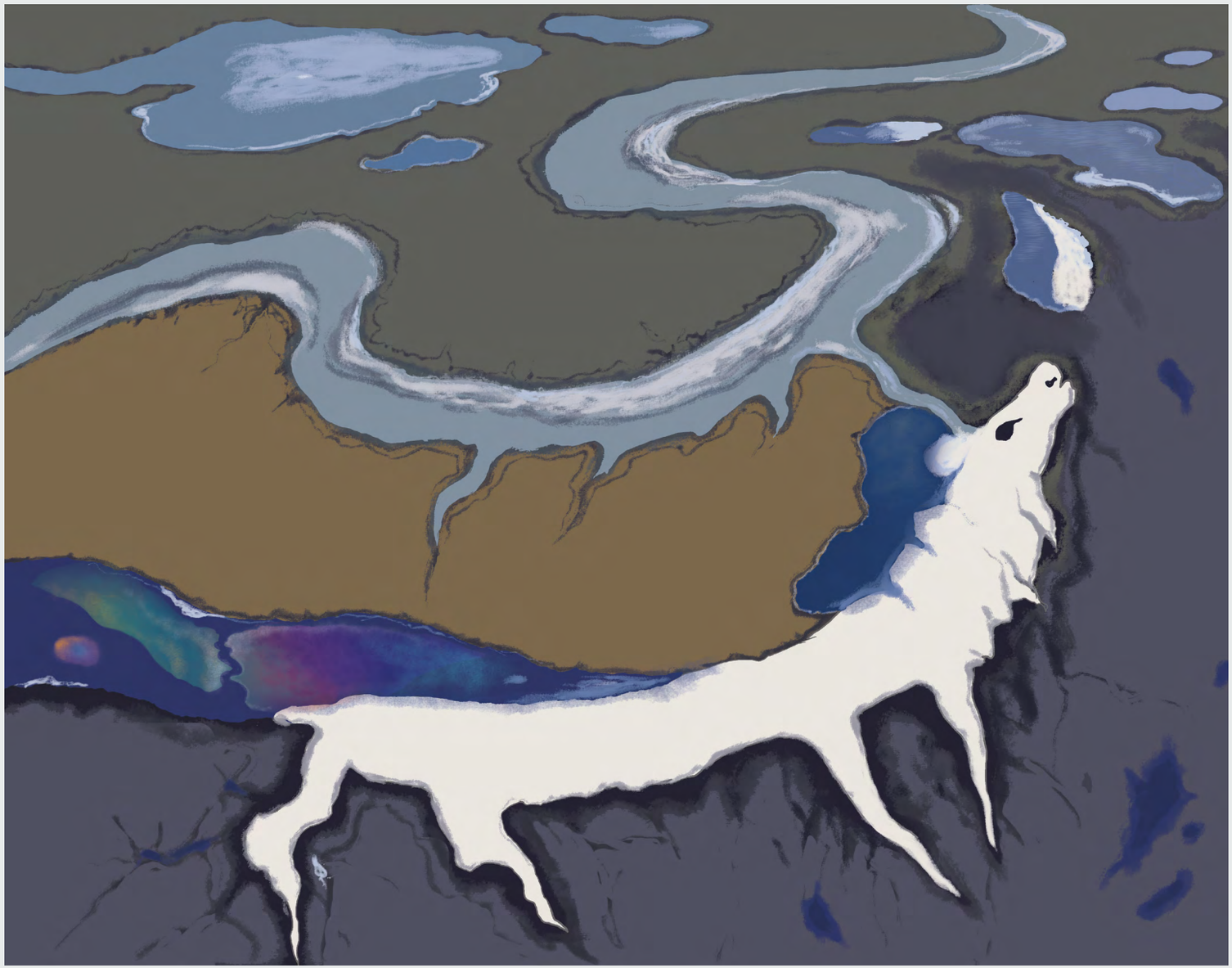


SOURCE : KLEINEN ET BROVKIN (2018). ADAPTÉ PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Décomposition modélisée de la matière organique dans le pergélisol sous-marin pour trois scénarios climatiques de 1900 à 2300, exprimée en millions de tonnes de carbone par an (TgC/an). La matière organique est décomposée en gaz à effet de serre, soit le méthane, soit le dioxyde de carbone.



SOURCE : RIDOLFI, ARNDT ET AL (EN PRÉPARATION). ADAPTÉ PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



© Olga Borjon-Privé (Oluko)

PORTRAIT PROFESSEUR ASSOCIÉ DE GÉOGRAPHIE ET D'AFFAIRES INTERNATIONALES À L'UNIVERSITÉ GEORGE WASHINGTON, ÉTATS-UNIS

Dmitry Streletskiy

J'ai grandi à Moscou, juste à côté d'un parc, où j'ai passé la majeure partie de mon enfance à grimper aux arbres. Les hivers moscovites étaient très rigoureux et la neige abondante. J'ai donc beaucoup skié et pratiqué d'autres activités liées aux climats froids. Je pense que c'est en partie pour cela que j'ai commencé à m'intéresser aux régions à climat froid. L'environnement arctique, en particulier la toundra, me fascinait avec son ciel bas et ses couleurs pastel.

J'ai toujours aimé voyager. Au lycée, j'ai réalisé qu'en étudiant la géographie, on pouvait être payé pour voyager. C'était l'idée que je me faisais d'un géographe et c'est pourquoi j'ai voulu en faire ce métier. Aujourd'hui, il est vrai que je passe la plupart de mon temps au bureau, mais l'aspect que je préfère dans mon travail, c'est encore le terrain.

Lorsque j'étais étudiant, j'ai participé à des expéditions axées sur les glaciers. Pour être honnête, forer dans les glaciers était un peu trop dur pour moi. La recherche sur le pergélisol était plus conviviale, car beaucoup de recherches sont limitées par la logistique et l'accès aux infrastructures. La recherche se fait plus près des gens et n'implique pas de s'asseoir sur des glaciers au milieu de nulle part à des altitudes élevées. Les travaux sur le pergélisol offrent de nombreuses possibilités d'emploi. On peut faire toutes sortes de choses.

J'ai réalisé que le pergélisol est essentiel pour les personnes et les communautés qui y vivent. J'ai commencé à étudier le lien entre les infrastructures et la nature, ainsi que les conséquences d'une modification du pergélisol. Après avoir obtenu un doctorat en climatologie à l'université du Delaware, je suis parti pour l'université George Washington, où je travaille depuis plus de dix ans à la recherche et à l'enseignement de la géographie physique de l'Arctique, des risques naturels et du changement climatique.

Donner des cours à des étudiants me motive vraiment parce qu'ils sont conscients des problèmes auxquels nous sommes confrontés et qu'ils sont anxieux. Ils veulent vraiment agir et s'engager. Cela m'aide à maintenir mon intérêt pour le sujet du pergélisol. Je pense que le pergélisol est un sujet sous-étudié et que les nouveaux sujets de recherche sur le pergélisol ne manquent pas. Nous avons besoin de géographes, de biologistes, de spécialistes des sciences sociales, d'économistes, d'ingénieurs et de spécialistes des matériaux…

Certaines des choses que nous communiquons, en tant que scientifiques du pergélisol, se concrétisent et deviennent des politiques, et je vois que des efforts sont faits dans la bonne direction. Mais parfois, il est un peu frustrant d'avoir une bonne connaissance et une bonne compréhension de quelque chose, et que cela ne trouve pas forcément d'écho auprès des autres. Je me retrouve à frapper à une porte, mais il n'y a personne pour l'ouvrir. Je pense que le pergélisol n'attire pas assez l'attention parce que ce n'est pas comme un tremblement de terre ou une éruption volcanique –un événement soudain et important –, mais c'est graduel. Pourtant lorsqu'un événement comme la marée noire Norilsk s'est produit, cela a été comme un tremblement de terre. Soudain, j'ai reçu des appels et des courriels de toutes sortes de personnes : des municipalités, des fonctionnaires, des investisseurs installés quelque part en Australie ou à Londres. Tout le monde voulait soudain savoir ce qu'était le pergélisol et ce qui lui arrivait.

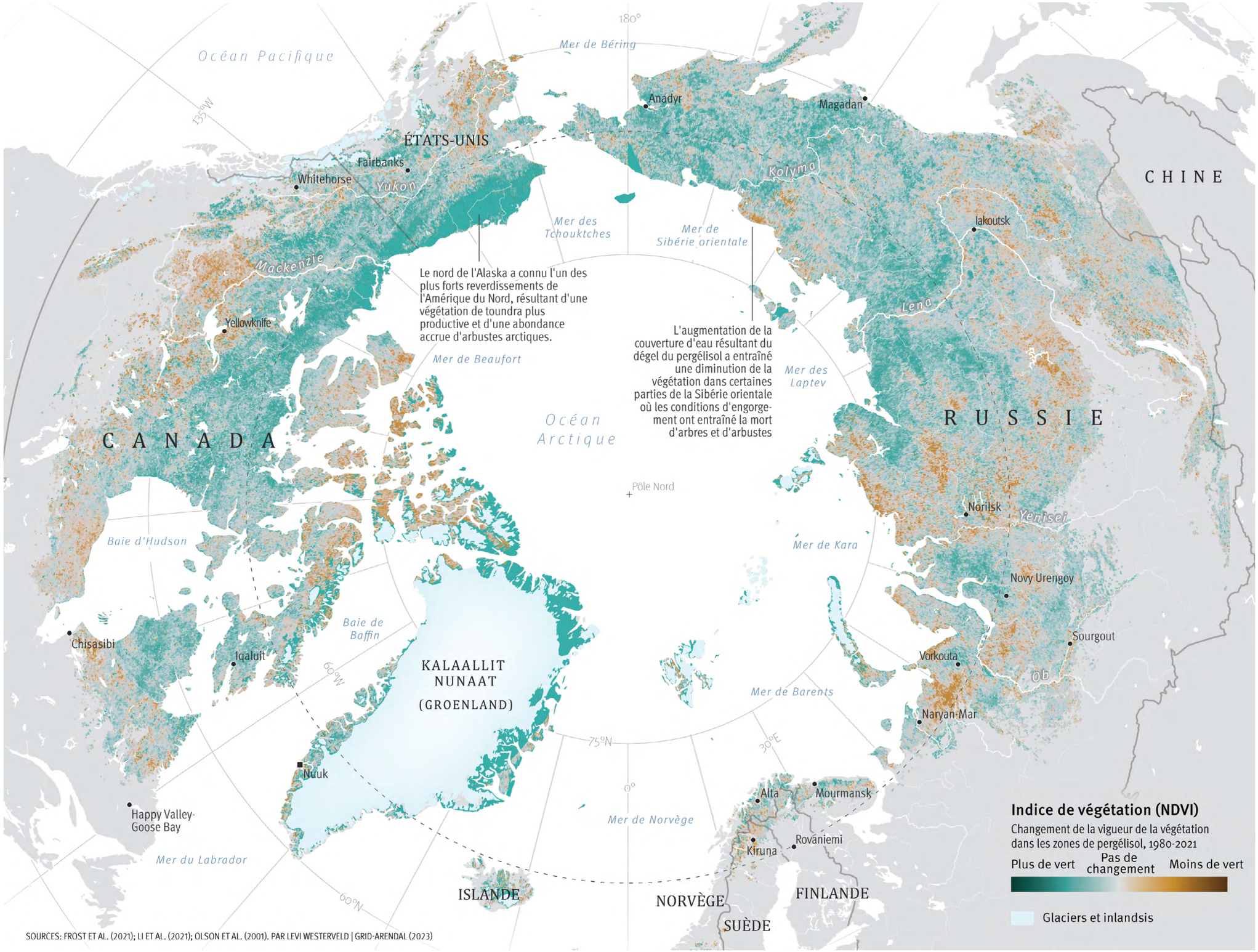
C'est très excitant de faire partie d'une petite communauté et de faire quelque chose que peu de gens font. Je suis à l'avant-garde d'un sujet, je pose de nouvelles questions et j'essaie d'y répondre, puis de communiquer ces réponses à divers groupes. Je pense également qu'il est très intéressant de rencontrer diverses parties prenantes, et pas seulement des scientifiques, lors de conférences. Discuter avec ces personnes m'aide à mieux comprendre ce qui se passe sur le terrain, et j'aime cela.



© Katie Orlinsky

Terrains en mouvement

Changements dans le pergélisol



SOURCES: FROST ET AL. (2021); LI ET AL. (2021); OLSON ET AL. (2001). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Froid et flore

Le rôle de la végétation dans les paysages de pergélisol

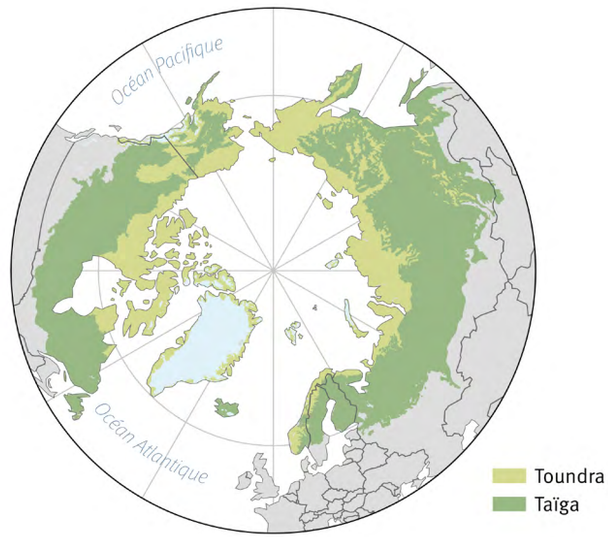
La végétation joue un rôle important et complexe dans les processus du pergélisol. Le dégel saisonnier de la couche active fournit un milieu dans lequel les plantes peuvent pousser. La présence de végétation contribue à son tour à isoler le pergélisol, à retenir l'humidité dans le sol de surface et à modérer les effets des variations de la température de l'air. L'influence de la végétation sur le pergélisol est également étroitement liée à l'accumulation de neige.

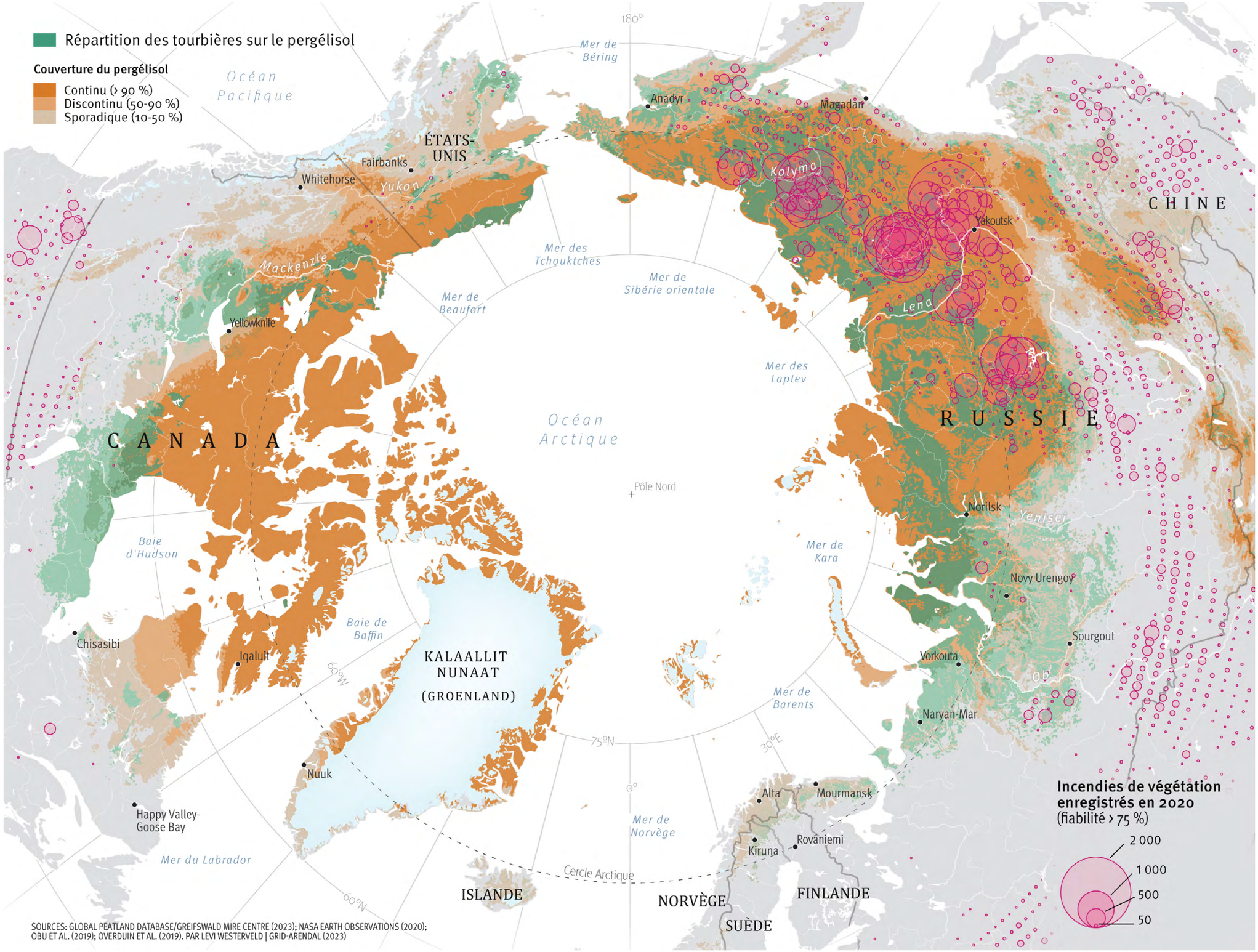
Lorsque la végétation est dense, l'ombre qu'elle procure peut refroidir la surface du sol. Les couverts arborés denses contribuent encore plus au refroidissement en limitant la quantité de neige qui atteint le sol. Cela affecte la répartition du pergélisol dans la zone discontinue. À l'inverse, lorsque la canopée est plus ouverte, la neige s'accumule plus facilement, ce qui apporte une isolation contre les basses températures, comme le long de la limite forestière. Les zones présentant d'épaisses couches de matière organique offrent également une meilleure isolation contre les variations de la température de l'air.

La toundra arctique est dominée par une végétation basse composée d'herbes, de carex, de joncs, de petites plantes à fleurs, de mousses, de lichens et d'arbustes. Toutefois, le réchauffement de l'Arctique modifie rapidement la végétation arctique, en repoussant les arbustes plus au nord. Les arbustes retiennent mieux la neige que la végétation basse de la toundra, ce qui atténue les effets de la température de l'air sur le pergélisol. Ainsi, les zones où les arbustes sont plus grands ont tendance à avoir des températures de surface plus chaudes que celles où la végétation de la toundra est plus basse.

Certains changements dans la végétation sont liés au dégel du pergélisol, en plus des étés plus chauds et plus longs, de l'augmentation des précipitations et de l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Le dégel progressif du pergélisol peut stimuler la croissance de la végétation en libérant des nutriments lors de la décomposition du carbone du sol. Mais lorsque le dégel est brutal, les communautés végétales peuvent connaître une mortalité élevée et des changements de composition à mesure que la surface du sol s'affaisse ou s'effondre. Le dégel du pergélisol entraîne également des modifications de l'épaisseur de la couche active, de la topographie locale et de la teneur en eau du sol. La relation entre l'évolution de la végétation de la toundra et le pergélisol n'est toutefois pas encore bien comprise.

Avec le réchauffement des étés arctiques et la modification des régimes de précipitations, les perturbations liées au climat, telles que les conditions météorologiques extrêmes et les incendies de végétation, deviennent également plus fréquentes et devraient s'intensifier au cours des prochaines décennies. Les étés chauds plus fréquents permettent parfois aux incendies de continuer à couver pendant l'hiver et de reprendre au printemps suivant. La perte de la végétation et de la couche organique de surface isolante à cause du feu peut exacerber le réchauffement du pergélisol. Des études ont montré que la température annuelle moyenne à la surface du sol est plus élevée de 1 à 7 °C sur les sites qui ont brûlé.





SOURCES: GLOBAL PEATLAND DATABASE/GREIFSWALD MIRE CENTRE (2023); NASA EARTH OBSERVATIONS (2020); OBU ET AL. (2019); OVERDUIN ET AL. (2019). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Le feu sur la glace

Tourbe, pergélisol et feu

De vastes zones de pergélisol arctique sont couvertes de tourbières : des écosystèmes de zones humides dont la surface est recouverte d'une couche de matière organique partiellement décomposée (tourbe). Elles sont surtout répandues dans le sud de l'Arctique, en particulier dans les basses terres de la baie d'Hudson au Canada et dans la vallée du fleuve Mackenzie, ainsi que dans toute la Sibérie. Elles se font plus rares au nord, où les précipitations plus faibles, les basses températures et les courtes saisons de croissance limitent leur formation. Les tourbières jouent un rôle crucial dans la régulation du climat de la Terre, en absorbant et en stockant le dioxyde de carbone de l'atmosphère, ce qui contribue à atténuer les effets du réchauffement climatique.

Sur les 5 millions de km² de tourbières estimées dans le monde, la plupart se trouvent dans les zones subarctiques et boréales. Les tourbières nordiques couvrent près de 4 millions de km², dont près de la moitié – environ 1,7 million de km² – sont recouvertes de pergélisol. Les tourbières sont d'importants réservoirs de carbone, contenant près d'un tiers du carbone du sol mondial, soit environ 450 à 650 milliards de tonnes. La majeure partie de ce carbone, soit 415 milliards de tonnes, est stockée dans les tourbières nordiques.

Les tourbières jouent un rôle important dans le maintien du pergélisol, l'épaisse couche de tourbe contribuant à le protéger des variations de température. En été, lorsque la tourbe est sèche, elle isole le pergélisol sous-jacent de l'air chaud. Lorsque la tourbe est humide ou gelée, elle permet à l'air froid de pénétrer dans le sol, contribuant ainsi à conserver le pergélisol là où il n'existerait pas autrement. Toutefois, les changements de température et de précipitations entraînent une diminution de l'étendue des tourbières à pergélisol. La superficie des tourbières à pergélisol a déjà diminué, passant d'environ 2 millions de km² à l'époque préindustrielle à 1,7 million de km² aujourd'hui. On prévoit qu'avec un réchauffement global de 2 °C, cette superficie diminuera à 1 million de km², et qu'avec un réchauffement de 6 °C, la quasi-totalité du pergélisol de ces tourbières aura disparu.

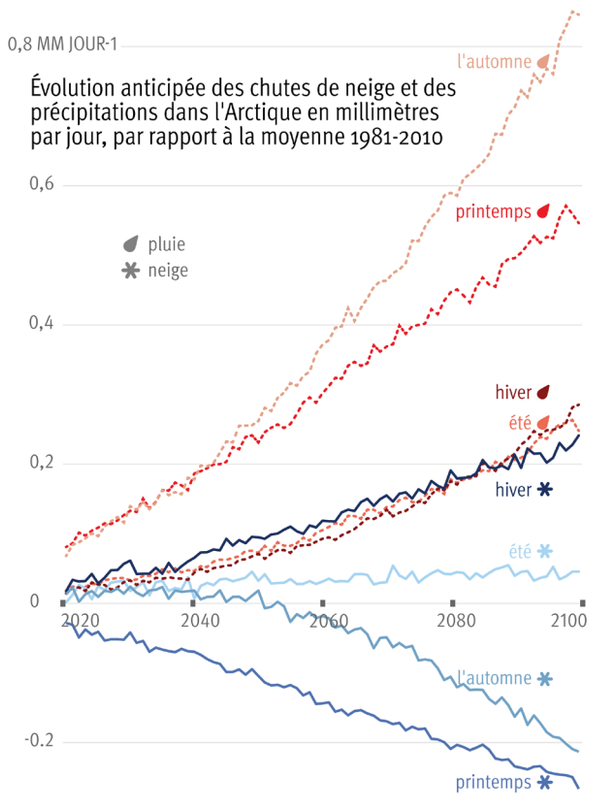
Les tourbières des hautes latitudes septentrionales, y compris les tourbières de pergélisol, sont vulnérables aux changements de température et de précipitations. L'augmentation des températures peut assécher la tourbe sus-jacente, ce qui la rend plus vulnérable aux incendies. Non seulement les incendies libèrent de grandes quantités de carbone provenant de la combustion de la tourbe, mais ils détruisent également les couches isolantes de végétation, de tourbe et de sol, ce qui accélère le dégel du pergélisol. Les effets combinés du changement climatique et des incendies de forêt peuvent transformer les tourbières à pergélisol de puits de carbone en sources de carbone, créant ainsi une boucle de rétroaction positive qui exacerbe les effets du réchauffement climatique. Les impacts sur le pergélisol sont encore plus graves dans la zone discontinue.

Le changement climatique augmente le risque d'incendies de forêt catastrophiques dans de nombreuses régions du monde ; même l'Arctique ne fait pas exception. Les étés 2019 et 2020 ont été marqués par des incendies de forêt sans précédent dans la région, les pires étant recensés en Sibérie, une région où les tourbières à pergélisol sont très étendues. Les températures plus élevées de l'hiver et du printemps ont conduit à des incendies qui se sont déclarés dès le mois de mai et qui ont brûlé plus longtemps, et plus au nord qu'à l'accoutumée. Dans les dépôts de tourbe, les incendies peuvent également continuer à couver sous la surface sans être détectés et reprendre de plus belle des semaines, voire des mois plus tard, lorsque les conditions sont favorables. Près de 140 000 km² ont brûlé lors des incendies de Sibérie en 2020, la plupart dans les zones de pergélisol. On estime que les incendies dans ces tourbières riches en carbone ont libéré 244 millions de tonnes de dioxyde de carbone, soit 35 % de plus que le précédent record établi lors des incendies de 2019.

État de la matière

Eau, neige et pergélisol

Que ce soit sous forme de précipitations, dans les plans d'eau ou sous forme de glace dans le sol, l'eau influence l'état du pergélisol, la rapidité de son dégel et les conséquences qui en découlent. La neige, par exemple, peut avoir un effet refroidissant ou réchauffant sur le pergélisol sous-jacent en fonction de lde son épaisseur, du moment de l'accumulation et de la durée de la saison froide. Lorsque la neige est plus épaisse, la température à la surface du sol est également plus élevée, car l'air froid de l'hiver ne peut pas pénétrer complètement dans le sol pour le refroidir. Les périodes de réchauffement du pergélisol



SOURCE : MCCRYSTALL ET AL. (2021). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

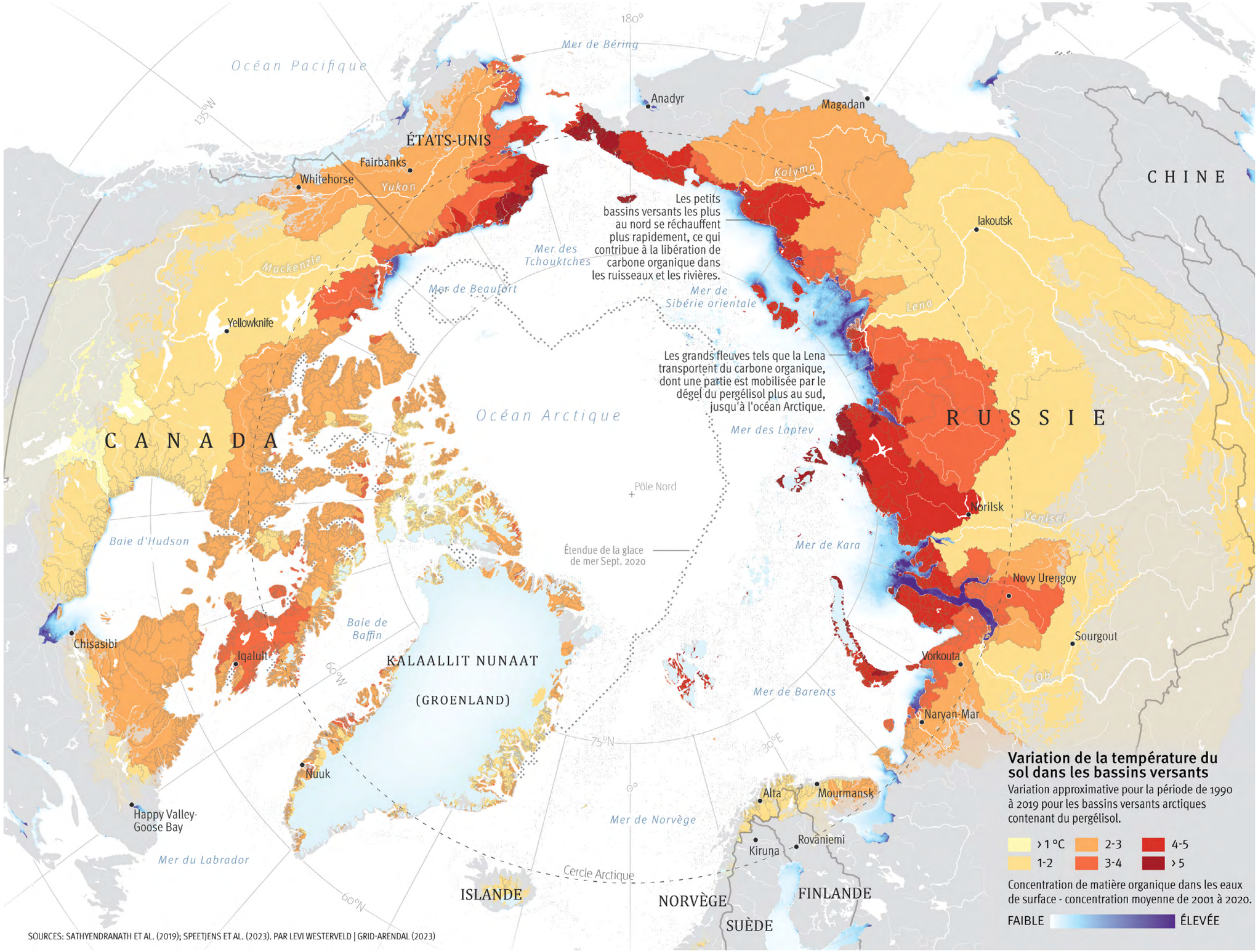
en Alaska (de la fin des années 1980 au début des années 1990) et en Norvège (1999-2009), par exemple, ont été liées à une couverture neigeuse plus épaisse ainsi qu'à une augmentation de la température de l'air. Une fine couche de neige refroidit le sol en raison de son albédo élevé, qui entraîne la réflexion du rayonnement infrarouge sur la surface blanche de la neige.

Le moment de l'accumulation et de la fonte de la neige est également important. Lorsque la neige hivernale arrive tardivement, la couche active peut regeler et le pergélisol situé en dessous peut se refroidir plus rapidement en réponse à la baisse de la température de l'air, alors qu'une accumulation de neige plus précoce peut retarder ces processus. Au printemps, l'effet est inversé : une fonte précoce peut entraîner un dégel plus rapide de la couche active, tandis que le dégel est retardé dans les zones où la couverture neigeuse persiste plus longtemps. Le sol enneigé ne peut pas dégeler. La couche active ne peut commencer à se développer que lorsque la neige a fondu.

Tous les scénarios de changement climatique indiquent des étés plus longs et plus humides dans l'Arctique, avec des précipitations plus importantes dans les scénarios à fortes émissions. Des précipitations estivales plus importantes peuvent entraîner une augmentation du dégel du pergélisol en raison de la capacité thermique élevée de l'eau. Après des étés très humides, les profondeurs de dégel peuvent prendre plus de temps pour revenir à des valeurs « normales ». Des précipitations plus importantes ont un effet encore plus grand dans les zones perturbées, par exemple lorsque le sol s'est affaissé en raison du dégel du pergélisol. L'accumulation d'eau de surface n'est pas inhabituelle dans ces sites et peut entraîner un nouveau dégel. L'augmentation des précipitations peut également entraîner une augmentation de la profondeur de la couche active dans les zones humides. Bien que la végétation offre une certaine protection, l'eau a tendance à s'accumuler dans ces zones de faible altitude et, en se réchauffant, peut réchauffer le pergélisol qui se trouve en dessous.

Le pergélisol a un impact important sur le fonctionnement hydrologique du sol, qui à son tour a un impact sur l'hydrologie de l'Arctique en général. La fonte des neiges plus précoce et l'augmentation du débit des rivières dans l'Arctique entraînent des périodes d'inondation plus précoces et plus longues dans les plaines d'inondation, ce qui a pour effet de réchauffer davantage le pergélisol sous-jacent. L'englacement plus tardif des rivières dans les bassins versants dominés par le pergélisol signifie que de l'eau plus abondante et plus chaude s'écoule à travers le pergélisol plus tard en automne, ce qui peut également entraîner une accumulation plus tardive de la glace de mer le long des côtes arctiques.

Les changements induits par le dégel affectent toutes les rivières de l'Arctique, mais ce sont les petits systèmes fluviaux qui se réchauffent le plus rapidement. Les régions de pergélisol les plus septentrionales comptent des milliers de petits tronçons ou segments de rivière, dont la plupart reposent sur un pergélisol continu et des sols à forte teneur en carbone. Dans de nombreuses régions, le paysage est fortement influencé par la glace présente dans le pergélisol. Les polygones de glace en sont un exemple important. Dans les systèmes côtiers plats, ces polygones de glace servent de petits bassins de rétention d'eau. Le réchauffement entraînera le dégel des crêtes entourant le polygone et la fonte des coins de glace, ce qui inversera le système. Le drainage du paysage sera alors plus efficace et le dégel se poursuivra. Ce phénomène peut, à son tour, entraîner une augmentation du lessivage et de l'exportation de nutriments tels que le carbonate, l'azote et le phosphore dans les rivières et l'océan Arctique, ainsi que du carbone dans l'atmosphère.



SOURCES: SATHYENDRANATH ET AL. (2019); SPEETJENS ET AL. (2023). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



SOURCE : IMAGE SATELLITE D'UNE PARTIE DU DELTA DU FLEUVE LENA DANS LE NORD-EST DE LA SIBÉRIE, RUSSIE. COPERNICUS SENTINEL-2, 2020-09-10 | PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



Les matériaux qui s'accumulent à la périphérie du delta l'étendent vers la mer. Dans le même temps, les vagues et les courants océaniques rongent le delta, créant un équilibre délicat entre la croissance et le rétrécissement.

Et au milieu coule une rivière

Rivières, deltas et hydrologie de l'Arctique

Les rivières et les deltas fluviaux jouent un rôle essentiel dans les écosystèmes arctiques. Alors que l'océan Arctique représente environ 1 % du volume des océans de la planète, il reçoit plus de 10 % de tous les débits fluviaux mondiaux. Outre ses nombreux petits réseaux fluviaux, l'Arctique abrite certains des plus longs fleuves du monde, dont l'Ienisseï, l'Ob et la Kolyma, ainsi que trois des plus grands deltas fluviaux du monde : la Lena, le Mackenzie et le Yukon.

Les deltas fluviaux sont des reliefs en forme d'éventail créés par le dépôt de sédiments à l'embouchure d'un fleuve. Caractérisés par des chenaux peu profonds et interconnectés, des lacs et des zones humides, les deltas abritent des écosystèmes, une flore et une faune diversifiés, y compris des populations d'oiseaux migrateurs. Les deltas constituent un lien crucial entre la terre et l'océan et ont une incidence sur le transport de l'eau douce, des sédiments, du carbone et d'autres matériaux.

Le pergélisol recouvre une grande partie du bassin versant de toutes les rivières de l'Arctique, grandes et petites. La présence de pergélisol contrôle en grande partie l'hydrologie de la région en limitant l'écoulement de l'eau. La présence de glace dans les deltas et sur les berges des rivières affecte les processus d'érosion et de sédimentation, ainsi que l'écoulement saisonnier de l'eau dans l'océan Arctique. Les berges gelées entravent le transport des sédiments car la glace protège le sol de l'érosion. Si le dégel du pergélisol s'accentue, le terrain peut devenir instable et entraîner l'érosion des berges et la formation de lacs thermokarstiques. Dans le nord-ouest du Canada, par exemple, l'augmentation des températures a déclenché l'érosion des berges et une accélération des effondrements rétrogressifs dus au dégel dans le delta du Mackenzie, entraînant une remobilisation rapide de grandes masses de sédiments et de carbone depuis les terrains riches en glace du pergélisol vers les cours d'eau adjacents.

À mesure que le dégel du pergélisol s'intensifie, il deviendra une source plus importante de carbone organique pour l'océan grâce à l'augmentation des débits fluviaux et à la mobilisation des matériaux érodés. Ce phénomène sera renforcé par l'augmentation des précipitations dans l'Arctique, qui entraînera un transport solide plus important en été et au début de l'automne, lorsque le dégel du pergélisol est également le plus intense. Ces changements hydrologiques auront un impact profond sur les écosystèmes terrestres des deltas, ainsi que sur l'équilibre de l'eau douce et les flux biochimiques dans l'océan.

L'océan Arctique est actuellement un grand puits de carbone, ce qui signifie qu'il absorbe le carbone de l'atmosphère et le stocke dans la colonne d'eau ou l'enfouit dans les sédiments du fond marin. L'augmentation des apports de carbone organique dans l'océan pourrait modifier cette situation, entraînant une augmentation du flux ou de l'échange de carbone de l'océan vers l'atmosphère.

Lorsque le dioxyde de carbone réagit avec l'eau, il produit de l'acide carbonique qui peut abaisser le pH de l'eau, et entraîner une acidification des océans. Ce phénomène affecte non seulement le fonctionnement des écosystèmes marins, mais réduit également la capacité de l'océan à absorber davantage de CO_2. Le CO_2 se dissolvant mieux dans l'eau froide, l'océan Arctique est plus sensible à l'acidification des océans. L'afflux accru de carbone organique provenant du ruissellement des rivières, résultant de la fonte du pergélisol, réduira encore la capacité de l'océan Arctique à absorber le carbone.

Aux confins du monde

La classification des côtes arctiques

Le pergélisol arctique s'étend sur les côtes de l'Alaska, du Canada, du Kalaallit Nunaat (Groenland), de la Norvège et de la Russie. Une grande partie de ce littoral pergélisolé se caractérise par la présence de glace dans le sol et sur la mer. Avec le réchauffement de l'Arctique, ces côtes deviennent vulnérables à l'érosion, ce qui modifie les écosystèmes côtiers et menace les établissements humains et les infrastructures. C'est pourquoi un système de classification géomorphologique a été mis au point pour les quelque 100 000 km de côtes bordant le bassin arctique. Il fournit une référence par rapport à laquelle les scientifiques peuvent mesurer les flux de sédiments, de carbone, de nutriments, de contaminants et d'autres paramètres au fur et à mesure que ces littoraux évoluent dans le temps.

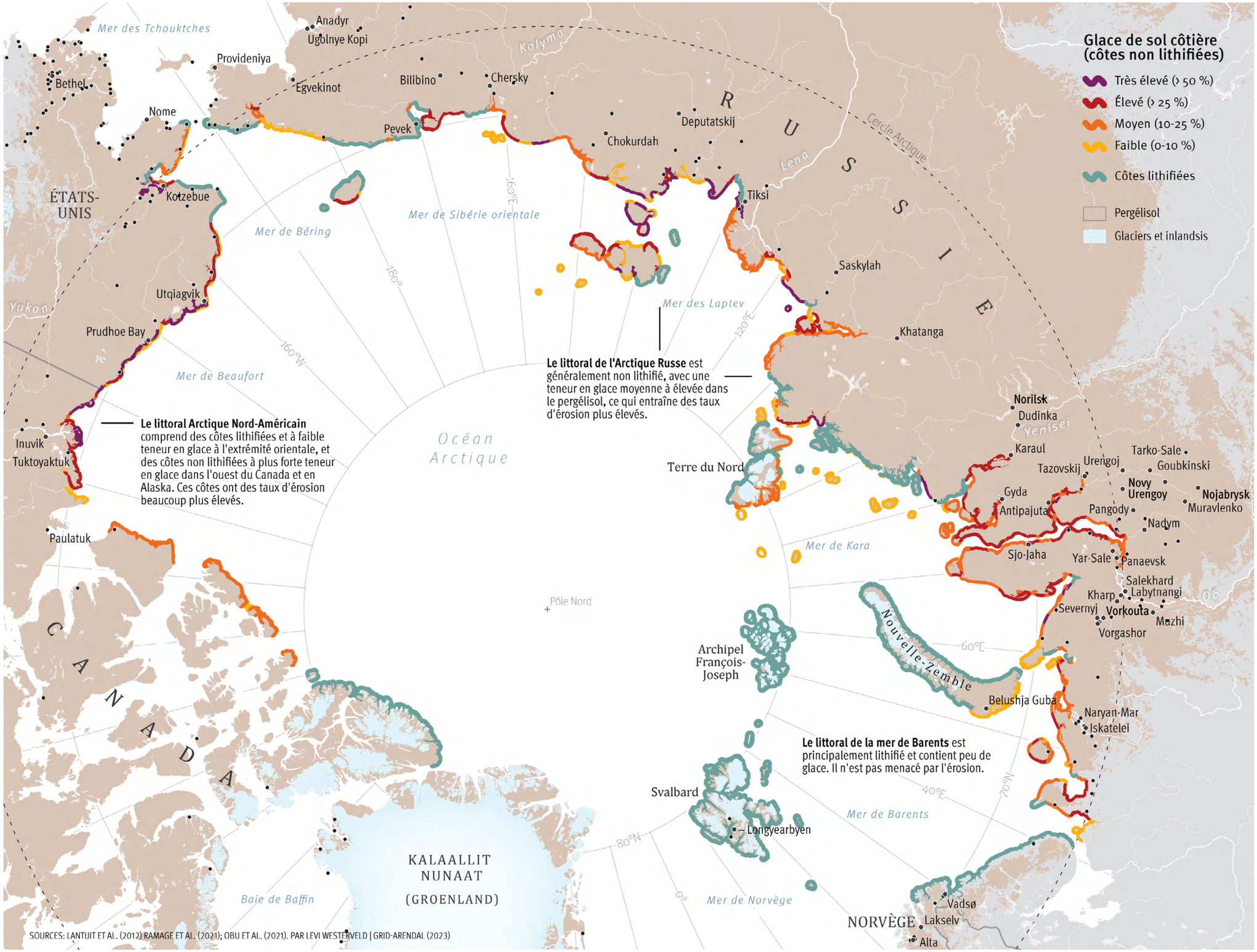
Les côtes arctiques présentent des variations considérables en termes de géomorphologie, de propriétés des sédiments et de taux d'érosion. Environ 35 % des côtes classées (environ 35 000 km) sont lithifiées (rocheuses). Ces côtes se trouvent principalement dans l'archipel canadien, dans le nord du Kalaallit Nunaat, dans le nord-ouest de la Russie (péninsule de Kola) et dans les îles de la mer de Barents (nord du Svalbard, Terre François-Joseph et Nouvelle-Zemble). Les côtes lithifiées se caractérisent par des rivages rocheux de faible altitude, des fjords et des falaises, et tendent à contenir peu ou pas de glace de fond. Ces côtes rocheuses sont relativement stables, l'érosion étant principalement due aux intempéries et à l'action des vagues, mais aussi à la fracturation due au gel et au dégel et à l'action directe de la glace. Elles étaient pour la plupart recouvertes par des calottes glaciaires continentales au cours du dernier maximum glaciaire (DMG), et certaines sont récemment découvertes par le retrait lent des glaciers et le retrait rapide des plates-formes glaciaires. De vastes fronts de glace subsistent, vêlant des icebergs.

La majeure partie des côtes du bassin arctique – 65 % ou environ 66 000 km – sont non lithifiées ou sédimentaires. Les côtes non lithifiées dominent les côtes du nord-ouest de l'Arctique canadien, de l'Alaska et de la majeure partie de la Sibérie : des régions qui n'étaient pas couvertes par des calottes glaciaires continentales au cours du DMG. Certaines côtes non lithifiées sont caractérisées par d'importants volumes de glace de sol, dont la quantité est déterminée par l'histoire glaciaire de la région. Les côtes non lithifiées de l'Alaska et de la Sibérie orientale, par exemple, sont caractérisées par le pergélisol de Yedoma, riche en glace, datant de la fin du Pléistocène. Les caractéristiques communes sont les suivantes : falaises de pergélisol riches en glace, crêtes de plage, cordons littoraux, flèches littorales, deltas et effondrements de dégel rétrogrades. Les côtes non lithifiées d'autres régions de l'Arctique, comme certaines parties de l'archipel canadien, du Kalaallit Nunaat et du Svalbard, contiennent moins de glace de fond mais peuvent être affectées par la glace d'ancrage, la remontée des glaces et l'empilement des crêtes de pression. Les cordons de blocs frangeants démontrent l'importance de la dérive de la glace de mer et de l'action des marées, mais ne sont guère affectées par le pergélisol.

La quantité et la répartition de la glace de sol dans le pergélisol influencent l'érosion thermique et mécanique, ainsi que d'autres processus géomorphologiques. Avec l'augmentation de la température de l'air, le sol est réchauffé à la fois par la surface (du haut vers le bas) et par la falaise côtière (de la côte vers l'intérieur), ce qui entraîne un dégel rapide du pergélisol et la fonte de la glace de sol. Les côtes non lithifiées, en particulier celles situées dans des régions riches en glace, sont vulnérables au changement climatique. À certains endroits, les taux d'érosion annuels peuvent dépasser 20 mètres par an.

La présence de glace de mer a également une grande influence sur les côtes pergélisolées. Avec le recul de la glace de mer dû au réchauffement climatique, les saisons sans glace s'allongent, ce qui expose davantage les côtes vulnérables à l'action des vagues. La réduction de la glace de mer se traduit par un fetch plus long, c'est-à-dire la distance à parcourir en eau libre, ce qui accroît l'énergie des vagues. Depuis le début des mesures par satellite en 1979, la glace de mer arctique a diminué de 13 % par décennie, soit une perte d'environ 80 600 km² par an, les déclins les plus importants ayant été enregistrés au cours des 15 dernières années. Avec l'allongement de la saison des eaux libres, les côtes seront exposées à davantage de tempêtes plus tard en automne, ce qui aura un impact sur les écosystèmes côtiers ainsi que sur les communautés et les infrastructures côtières.

Si l'érosion est un problème sur de nombreuses côtes sédimentaires du pergélisol, moins de recherches ont été menées sur les côtes polaires émergentes, c'est-à-dire les zones où la terre s'élève ou s'étend, comme les deltas et d'autres formes de relief accumulant des sédiments, entraînant le développement d'un nouveau pergélisol. L'ajustement isostatique glaciaire est dû à la remontée de la croûte terrestre après qu'elle ait été comprimée lorsqu'elle était recouverte d'épaisses calottes glaciaires au cours de la dernière période glaciaire. La côte Est de la baie d'Hudson au Canada, dans le nord du Québec, par exemple, s'élève d'environ 13 millimètres par an. La surveillance effectuée depuis 2005 montre que le pergélisol se forme et s'approfondit dans des terres qui sont actuellement exposées à un climat froid. Une aggradation similaire du pergélisol a été documentée sur d'autres sites autour de la baie d'Hudson et dans l'archipel arctique canadien.



SOURCES: LANTUIT ET AL. (2012) RAMAGE ET AL. (2021); OBU ET AL. (2021). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

L’usure du temps

L’érosion des côtes arctiques pergélisolées

Comme partout ailleurs, les principaux facteurs d’érosion côtière dans l’Arctique sont l’augmentation de la température de l’air, l’élévation du niveau de la mer et l’action des vagues. La plupart des côtes du monde subissent une érosion physique (par l’action des vagues). Cependant, les côtes arctiques sont également touchées par l’érosion thermique (due à l’augmentation de la température de l’air et de l’eau). La présence de glace de fond constitue la principale différence entre les côtes arctiques et toutes les autres côtes et les rend particulièrement vulnérables à l’érosion.

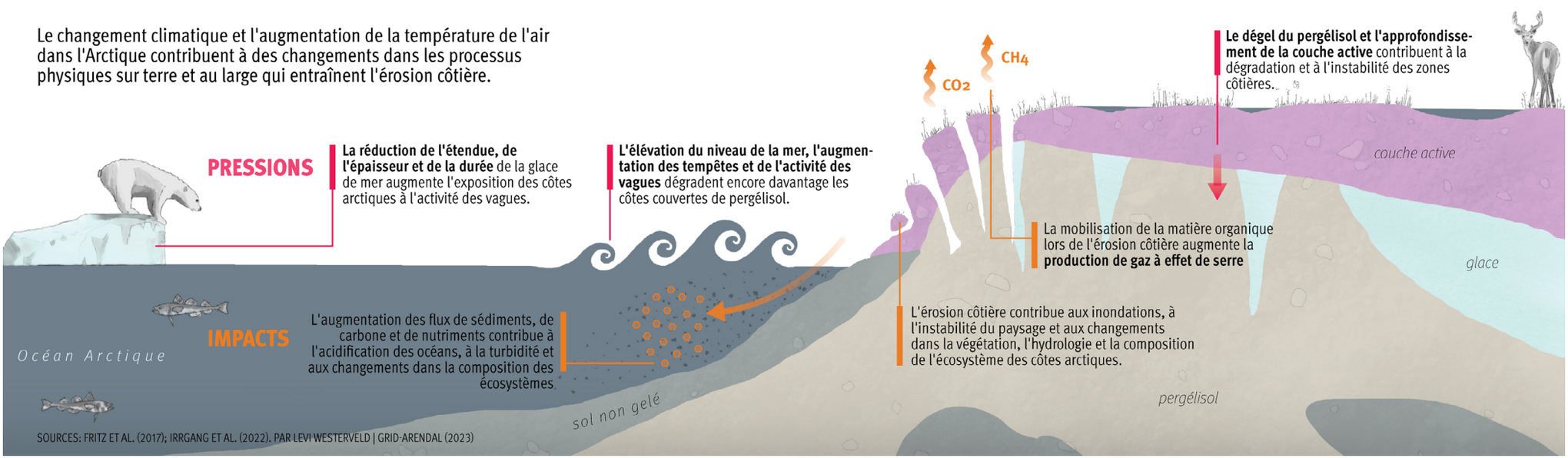
Contrairement à la plupart des autres côtes du monde, la température de l’air joue un rôle important dans les changements côtiers dans l’Arctique. L’augmentation des températures affecte non seulement la température du sol et l’épaisseur de la couche active, mais aussi la température de la mer, l’étendue de la glace de mer et la durée de la couverture de glace de mer. Les falaises de pergélisol riches en glace sont particulièrement touchées par la dénudation thermique, processus par lequel l’augmentation de la température de l’air et le dégel du pergélisol provoquent le relâchement et l’effondrement de certaines parties de la paroi de la falaise. À mesure que le pergélisol côtier se dégrade, il peut également être soumis à l’intrusion d’eau salée due à l’action des vagues, ce qui accentue encore l’érosion.

L’évolution du niveau de la mer, tant à la hausse qu’à la baisse, affecte les littoraux. Son élévation peut notamment exacerber l’abrasion thermique, car les vagues atteignent plus haut la face de la falaise. Même les variations temporaires du niveau de la mer, par exemple lors de tempêtes, peuvent entraîner des modifications du littoral et accroître l’abrasion thermique.

L’action des vagues dépend de la vitesse et de la direction du vent, du fetch (distance d’eau libre sur laquelle souffle le vent) et de la bathymétrie du littoral (mesure de la profondeur sous-marine). Dans l’Arctique, le fetch annuel moyen est fortement influencé par la durée de la saison des eaux libres, c’est-à-dire la partie de l’année où il n’y a pas de glace de mer. Plus la saison des eaux libres est longue, plus l’érosion est importante. Certaines des tempêtes les plus violentes se produisent en septembre et en octobre, période où la glace de mer est à son minimum et où la couche active du pergélisol et les températures de surface sont à leur maximum, ce qui rend les côtes pergélisolées plus vulnérables à l’érosion.

L’abrasion thermique est un mécanisme par lequel la température de l’eau et l’énergie des vagues érodent les côtes de pergélisol riches en glace. L’impact de l’abrasion thermique sur les côtes riches en glace est trois à quatre fois plus important que l’action des vagues seules. Dans certaines régions, la dénudation thermique et l’abrasion

Le changement climatique et l'augmentation de la température de l'air dans l'Arctique contribuent à des changements dans les processus physiques sur terre et au large qui entraînent l'érosion côtière.



SOURCES: FRITZ ET AL. (2017); IRRGANG ET AL. (2022). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

thermique agissent conjointement pour attaquer respectivement le sommet et la base des falaises.

Une autre forme d'érosion, connue sous le nom d'effondrement de blocs, se produit lorsque les vagues sapent des sections d'une falaise. Les niches créées par l'abrasion thermique peuvent s'étendre sur plusieurs mètres dans la base de la falaise, en particulier dans les horizons riches en glace, provoquant l'effondrement de grands blocs de sédiments liés à la glace. En quelques jours ou quelques mois, ces blocs sont érodés par l'action des vagues. Certains des taux d'érosion les plus élevés de l'Arctique résultent de l'effondrement de blocs, atteignant 48,8 mètres sur la côte de la mer de Beaufort en Alaska en 2008.

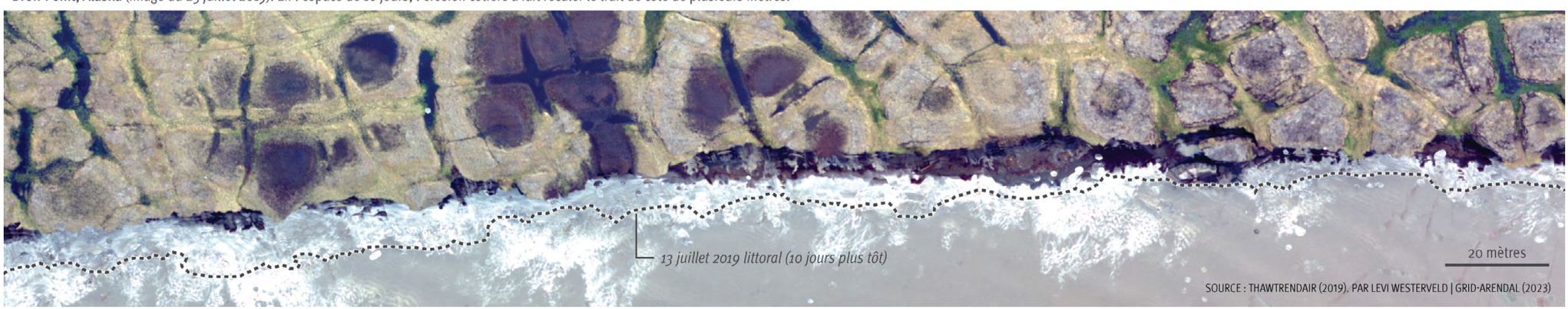
L'érosion des côtes peut avoir de nombreux impacts sur l'environnement naturel et les établissements humains. La dégradation du pergélisol peut libérer de grandes quantités de carbone organique, de nutriments et de contaminants dans l'environnement aquatique et dans l'atmosphère. On estime que l'érosion côtière apporte chaque année 14 millions de tonnes de carbone organique particulaire à l'océan Arctique, soit plus que l'apport des rivières. L'érosion côtière est également responsable de l'entrée de 1,6 million de tonnes d'azote par an dans l'océan Arctique. Bien que cet afflux important de nutriments puisse augmenter la production primaire dans la zone littorale, l'impact global sur les écosystèmes côtiers reste mal compris.

Une partie du carbone provenant de l'érosion des côtes sera absorbée par les organismes et les sédiments marins, mais elle sera également libérée dans l'atmosphère. Lorsque le carbone organique actuellement stocké dans le pergélisol est exposé par l'érosion, il commence à dégeler et à se décomposer, libérant ainsi du dioxyde de carbone et du méthane dans l'atmosphère. Des études montrent que l'émission de gaz à effet de serre provenant des falaises côtières en érosion commence dès que le carbone est exposé à l'eau de mer.

L'érosion côtière peut menacer directement les établissements humains. La communauté de Tuktoyaktuk, sur la côte canadienne de la mer de Beaufort, par exemple, a subi d'importants dégâts à cause de l'érosion côtière. Bien que de nombreux efforts aient été déployés pour protéger la communauté de la mer, la côte s'est érodée au point que de nombreux bâtiments doivent être déplacés plus à l'intérieur des terres sous peine d'être emportés par les eaux. Dans certains endroits, l'érosion côtière est si importante que des communautés entières doivent être déplacées (par exemple, Shishmaref et Kivalina en Alaska). Cette proposition n'est pas facile à mettre en œuvre, car les coûts de relocalisation sont élevés et les identités culturelles de ces communautés sont intimement liées à leur emplacement actuel.

L'érosion côtière affecte également le patrimoine culturel de l'Arctique. De nombreux sites archéologiques et culturels ont été détruits en Alaska et au Canada. Même au Kalaallit Nunaat (Groenland) et au Svalbard, qui sont moins sensibles à l'érosion en raison de leur littoral généralement rocheux, les objets culturels situés le long des côtes sont menacés par le réchauffement climatique.

Drew Point, Alaska (image du 23 juillet 2019). En l'espace de 10 jours, l'érosion côtière a fait reculer le trait de côte de plusieurs mètres.



SOURCE : THAWTRENDAIR (2019). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)


1 En été, lorsque le soleil et les températures élevées de l'air chauffent le mur de tête de l'effondrement de dégel rétrograde, le pergélisol dégèle et s'écoule vers la mer. La neige de l'hiver précédent qui n'a pas encore fondu est visible sur certaines parties de la paroi frontale.
50 mètres
N
2 Des mares de boue et d'autres matériaux s'accumulent depuis le mur de tête dans la zone appelée "plancher d'affaissement".
3 La fonte de la neige et de la glace dans le pergélisol, ainsi que la pluie, créent un système de drainage qui transporte les sédiments de l'effondrement rétrograde du dégel jusqu'à la côte.
4 Une grande quantité de sédiments rejetés dans la mer entraîne des niveaux élevés de turbidité de l'eau, ce qui affecte la disponibilité de la lumière pour les organismes marins.

Ronger le paysage

Le dégel rétrograde s'effondre

L'une des caractéristiques du dégel du pergélisol est l'apparition d'effondrements rétrogrades. Il s'agit de grandes dépressions incurvées le long des côtes, des berges de rivières, des rives de lacs et des pentes de collines. Ces effondrements se produisent lorsque des masses de glace dans le pergélisol sont exposées à l'air chaud, ce qui les rend vulnérables à un dégel rapide et à l'érosion. Lorsque la glace fond, une boue d'eau et de sédiments se déplace vers le bas de la pente et le mur de tête recule – ou rétrograde –vers l'intérieur des terres. Le dégel du pergélisol peut entraîner la libération de gaz à effet de serre et de contaminants stockés dans le pergélisol, parfois depuis des milliers d'années. Les effondrements rétrogressifs dus au dégel sont fréquents dans le pergélisol riche en glace de l'ouest de l'Arctique canadien, du Yedoma en Sibérie orientale et de la région centrale de la Iakoutie en Russie, où ils sont appelés thermo-terrasses ou thermo-cirques. Elles peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres de large et rétrograder de plusieurs centaines de mètres vers l'intérieur des terres.

À mesure que le climat se réchauffe, l'activité des effondrements rétrogressifs dus au dégel s'intensifie. Sur la péninsule de Taïmyr, située entre la mer de Kara et la mer des Laptev en Sibérie, les effondrements rétrogressifs ont été multipliés par 43 entre 2010 et 2021. Au cours de cette même période, la mobilisation du carbone a été multipliée par 28. Cette augmentation coïncide avec une vague de chaleur extrême dans le nord de la Sibérie au cours de l'été 2020, où la région a connu des températures record (38 °C). Comme le climat continue à se réchauffer, on peut s'attendre à ce que des vagues de chaleur dans l'Arctique se produisent plus souvent, ce qui exacerbera les impacts sur le pergélisol.

Malgré les risques considérables associés à l'augmentation de l'activité de fonte rétrograde, celle-ci est encore mal prise en compte dans le cycle du carbone de l'Arctique.



SOURCE : MODIFIÉ DE VIEIRA ET AL. (2018). PAR LEVI WESTERVELT | GRID-ARENDAL (2023)



SOURCE : MODIFIÉ DE VIEIRA ET AL. (2018). PAR ALEX TAIT | GRID-ARENDAL (2023)



© Olga Borjon-Privé (Oluko)

PORTRAIT PROGRAMME DE SURVEILLANCE COMMUNAUTAIRE DE LA RÉGION DES ÉTABLISSEMENTS INUVIALUITS, INUVIK, TERRITOIRES DU NORD-OUEST

Angus Alunik

Je m'appelle Angus Alunik et je suis né au bord d'un petit ruisseau appelé « Awa »» dans le delta du Mackenzie en 1952. Peu après ma naissance, ma mère est décédée et j'ai été recueilli quelques jours plus tard par mes parents adoptifs, Ishmael et Ruth. Heureusement, ils ont gardé de bonnes relations avec mon père biologique, ce qui m'a permis de connaître mes racines.

Nous avons vécu dans le bush la plupart du temps, jusqu'en 1969 ou 1970, date à laquelle nous avons déménagé à Stringer Hall. En mai, avant que la glace ne fonde, mon père m'emmenait camper au printemps. Je passais beaucoup de temps à chasser avec lui, car il voulait que j'apprenne les ficelles du métier. Mon frère, lui, restait à l'école. Lorsque la glace était encore présente, nous quittions souvent la cabane et montions une tente pour nous trois. Nous nous promenions, laissant les chiens derrière nous, installant des pièges à rats musqués et attrapant même parfois des castors. Il y a quelques années, la glace restait là jusqu'en juin.

Je me souviens qu'il y a des années, mon père fabriquait une petite fosse pour conserver des produits congelés. On creusait un peu jusqu'à ce qu'on atteigne le pergélisol et on y mettait du poisson et de la viande. Beaucoup de gens construisaient des maisons de glace. Ils mettaient des rondins de bois, de la boue autour et une petite porte. C'était bien à l'époque, mais des années plus tard, j'ai remarqué qu'il fallait creuser de plus en plus profond pour atteindre le pergélisol. Son dégel est bien réel.

Je constate également beaucoup d'érosion, non seulement chez moi, là où se trouve mon campement, mais tout au long des contreforts, d'Inuvik jusqu'à Reindeer Station. Après avoir quitté Edmonton, j'ai construit une maison pas très loin de l'endroit où se trouvait la cabane en rondins de mon père. Lorsque j'ai construit ma maison, il y avait un lac derrière moi, et un autre lac vers le fleuve Mackenzie sur le côté gauche. À l'époque, tout allait bien, car nous ne voyions aucun signe d'érosion. Mais après une dizaine d'années, j'ai remarqué que nous commencions à perdre des berges. Nous étions allés nous coucher pour la nuit, j'avais fait tourner le générateur à environ 100 mètres de la berge. C'était au cours de l'été 2000. Le lendemain matin, alors que nous prenions notre petit-déjeuner, ma femme m'a dit : « Je croyais que ton générateur était là-bas. » J'ai regardé dehors, choqué. Quoi ?! Où est mon générateur ? Je me suis approché et j'ai vu que nous avions perdu une partie de la berge de la taille de la maison. Elle avait tout simplement disparu.

Depuis lors, nous perdons constamment des berges. Toutes les quelques années, je devais emprunter un treuil pour faire reculer la maison, car la berge était si proche. Puis, soudainement, le lac derrière nous a disparu, drainé dans le canal. À partir de là, la situation a empiré. Il y a environ 5 ans, j'ai perdu toute ma maison. La cabane que j'avais construite est passée par-dessus la berge et j'ai perdu tout ce qu'elle contenait.

Certaines personnes organisaient déjà des réunions à ce sujet, mais je ne participais à aucune d'entre elles. Je n'ai commencé à assister à des réunions que récemment, mais comment peut-on réparer Mère Nature ? Je ne pense pas qu'on puisse le faire. Je pense qu'elle va continuer à se manifester. Alors, pour moi, je m'en accommode. Je veux dire, pourquoi se mettre en colère ? On peut organiser toutes les réunions que l'on veut et essayer d'y remédier. Mais je ne pense pas que nous puissions le faire. Je pense que maintenant que cela a commencé, nous ne pourrons jamais l'arrêter.

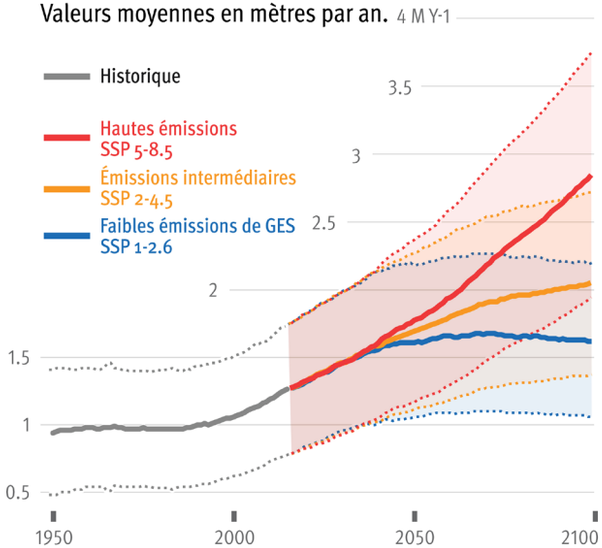
Perdre du terrain

Taux projetés d'érosion côtière dans l'Arctique

Les côtes arctiques sont soumises à l'érosion par des forces mécaniques (par exemple, l'action des vagues) et thermiques (par exemple, l'augmentation de la température de l'air). Ces forces se conjuguent pour dégeler le pergélisol, faire fondre la glace de sol et user les matériaux de la côte. À mesure que l'Arctique continue de se réchauffer, les côtes pergélisolées dégèlent, ce qui risque de libérer des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et d'exacerber les facteurs d'érosion côtière.

Le taux d'érosion côtière a augmenté au cours des dernières décennies. Entre 1850 et 1950, le taux moyen d'érosion côtière était estimé à 0,9 mètre par an, en ne considérant que les segments érosifs, soit 0,5 mètre par an sur les 400 000 km de côtes faisant face au bassin arctique. D'ici la fin du siècle, on estime que le taux moyen d'érosion côtière pour les côtes rocheuses et sédimentaires augmentera de 2 mètres par an dans un scénario de changement climatique intermédiaire, et de 2,6 mètres par an dans un scénario de changement climatique élevé. La modélisation actuelle montre que l'érosion côtière dans l'Arctique dépassera probablement sa portée historique d'ici 2050 environ, et peut-être même avant.

Taux d'érosion modélisés des côtes arctiques
Valeurs moyennes en mètres par an. 4 M Y-1

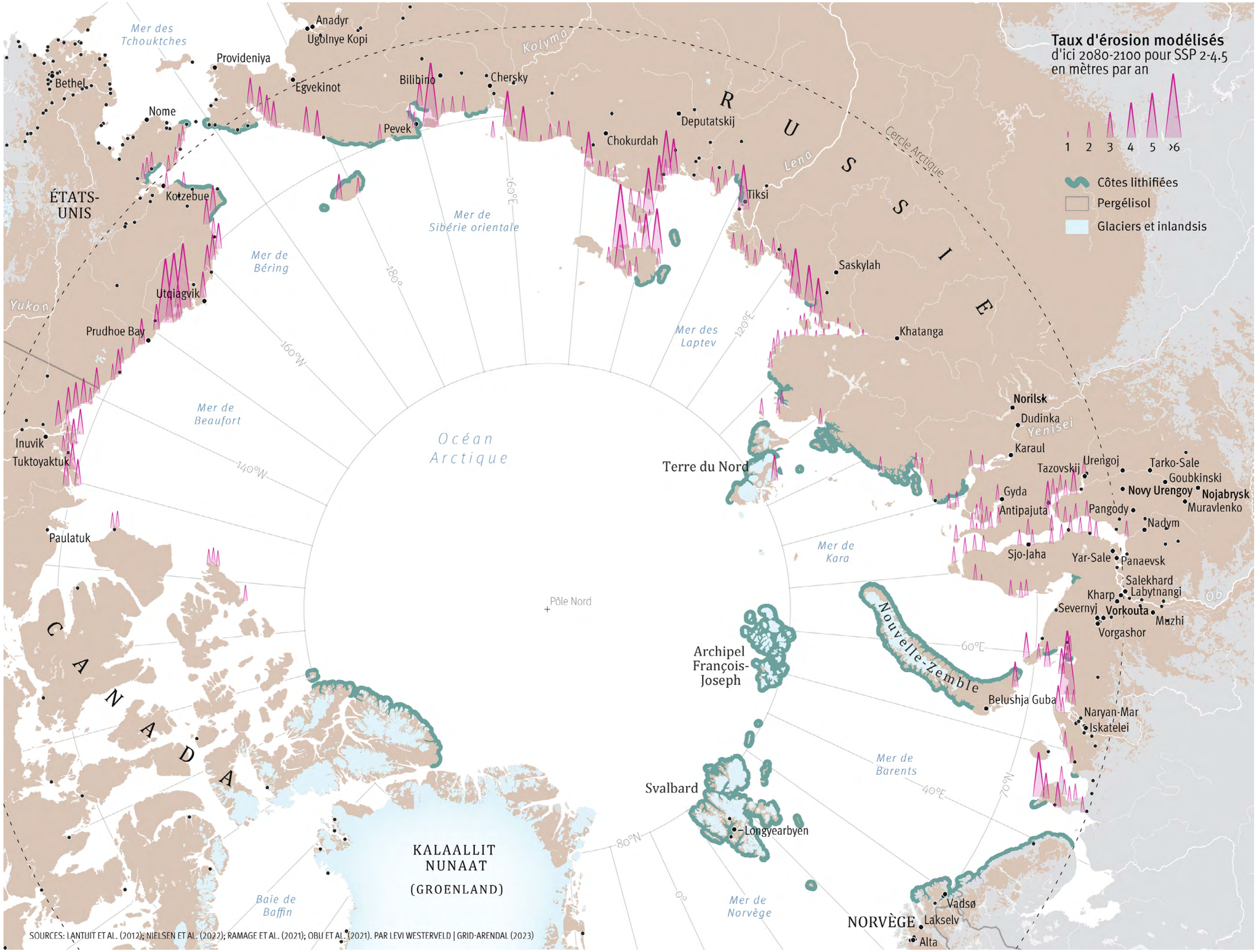


SOURCE : NIELSEN ET AL. (2022). ADAPTÉ PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

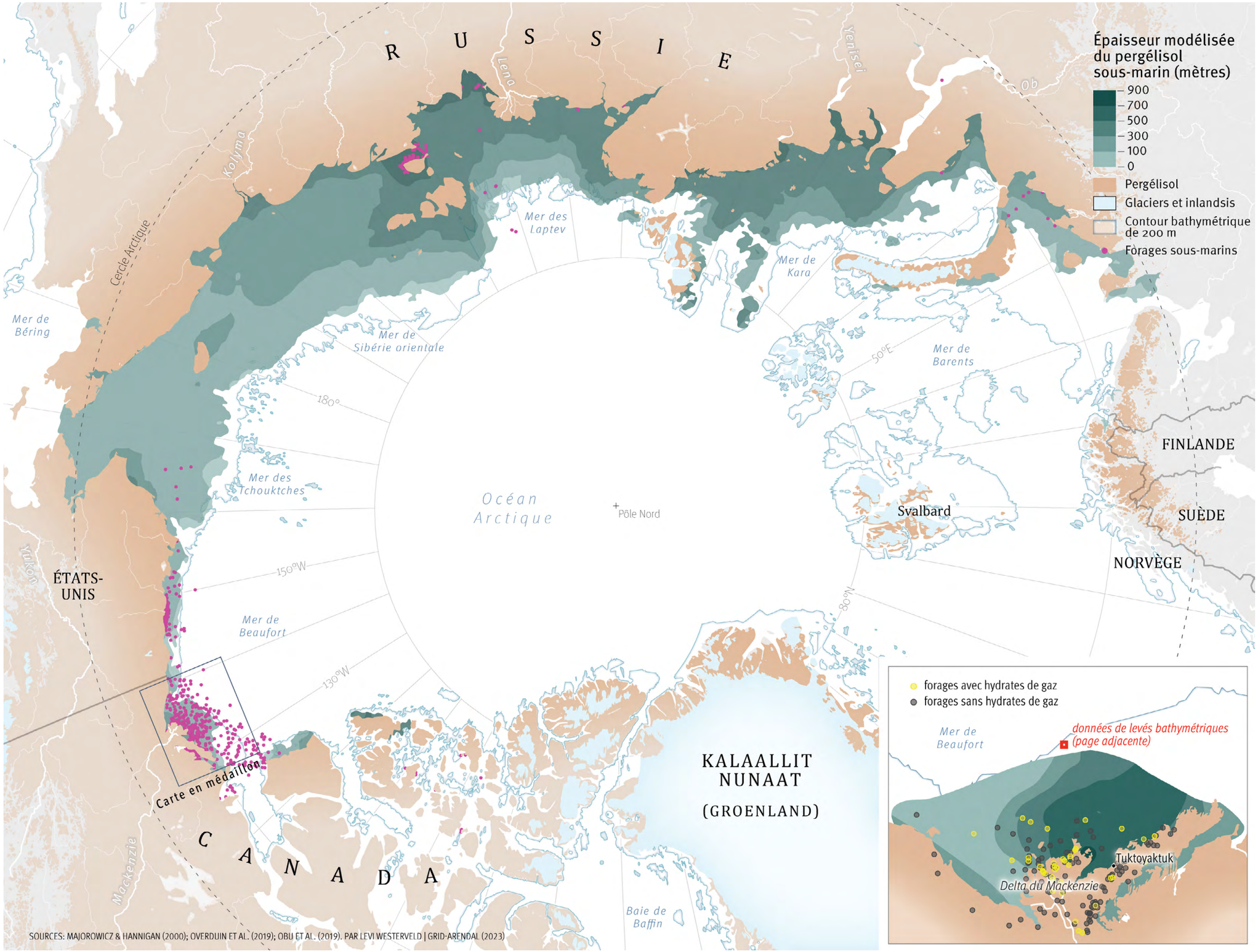
L'érosion côtière libère de grandes quantités de carbone organique dans l'océan. Les plus grandes pertes actuelles et prévues de carbone organique – environ 75 % – se situent dans les mers de Laptev et de Sibérie orientale, en Russie. L'érosion côtière dans cette région est très importante, pouvant atteindre 20 mètres par an. Cette région est également dominée par des dépôts de yedoma riches en glace et de hautes falaises à forte teneur en carbone organique. Les pertes les plus importantes se situent le long de la côte de la mer de Beaufort, au Canada et en Alaska, et représentent environ 12 % du total de l'Arctique. Le reste des pertes de carbone organique dans l'Arctique provient des autres mers arctiques marginales.

De nombreuses incertitudes entourent l'érosion côtière future, mais même dans les scénarios de faibles émissions, les taux d'érosion devraient augmenter au moins jusqu'au milieu du siècle. Dans les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre les plus élevés, cependant, l'érosion côtière continuerait à augmenter au-delà de 2050, libérant entre 2,3 millions de tonnes (scénario d'émissions intermédiaires) et 4,2 millions de tonnes (scénario d'émissions élevées) de carbone organique par an. Entre 1850 et 2100, on estime qu'environ 2 000 milliards de tonnes de carbone seront libérées par le pergélisol en raison de l'érosion côtière. Cela représente 17 à 26 % des pertes totales de carbone dues au dégel du pergélisol dans l'Arctique. Mais ces estimations sont entachées d'incertitudes considérables. La quantité réelle de carbone libéré dépendra du degré de réchauffement atteint ainsi que de l'impact de ce réchauffement sur les processus écologiques et géomorphologiques associés à l'érosion côtière.

L'érosion côtière est importante pour la production primaire marine dans l'Arctique, car elle libère et transporte du carbone organique dans l'environnement aquatique. Le devenir de l'augmentation du carbone organique dans l'Arctique est encore relativement inconnu. Il peut se déposer dans les sédiments marins où la décomposition sera très lente (pendant des millénaires), ou être partiellement décomposé avant de pénétrer dans l'océan, libérant ainsi des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Il est également possible qu'il se dégrade dans la colonne d'eau ou qu'il soit transporté plus loin. La dégradation dans la colonne d'eau se produit par un processus de minéralisation, qui modifie l'alcalinité et le pH de l'océan et augmente le carbone inorganique dissous et les réserves de nutriments, ce qui a un impact sur la production primaire et les flux de carbone entre l'air et la mer.



SOURCES: LANTUIT ET AL. (2012); NIELSEN ET AL. (2022); RAMAGE ET AL. (2021); OBU ET AL. (2021). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



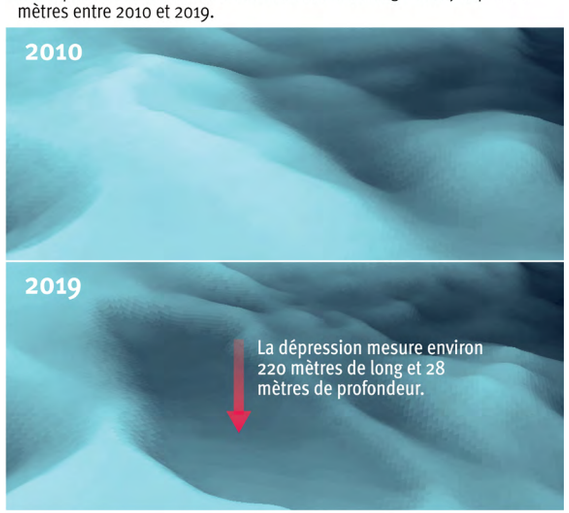
SOURCES: MAJOROWICZ & HANNIGAN (2000); OVERDUIN ET AL. (2019); OBU ET AL. (2019). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Sous les vagues

Évolution du pergélisol sous-marin

Le pergélisol n'est pas seulement présent sur la terre ferme, mais aussi sous le plancher océanique. Le pergélisol sous-marin est une relique du pergélisol terrestre qui s'est formée au cours du dernier maximum glaciaire (DMG), lorsque le niveau de la mer était inférieur de plus de cent mètres au niveau actuel, exposant ainsi les plateaux continentaux actuels. Lorsque les calottes glaciaires se sont retirées et que le niveau de la mer a augmenté, le pergélisol qui s'était formé sur la terre ferme a été submergé par l'océan. Comme le pergélisol terrestre, le pergélisol sous-marin est composé de sédiments et de roches gelés et peut ou non contenir de la glace. Dans l'hémisphère nord, le pergélisol sous-marin est cinq fois moins étendu que le pergélisol terrestre. La majeure partie du pergélisol sous-marin se trouve dans le nord de la Sibérie, mais une partie s'étend jusqu'en Alaska et dans le nord-ouest du Canada, des zones terrestres qui ont été exposées pendant la majeure partie de la dernière période glaciaire. L'épaisseur du pergélisol sous-marin varie dans l'Arctique. Dans la plupart des endroits, il mesure moins de 200 mètres d'épaisseur, mais il peut atteindre des profondeurs plus importantes. La modélisation suggère que le pergélisol dans les mers de Laptev, de Kara et de Sibérie orientale peut atteindre plus de 700 mètres d'épaisseur par endroits.

Les levés bathymétriques montrent que la profondeur des fonds marins sur le plateau canadien de la mer de Beaufort a augmenté jusqu'à 28 mètres entre 2010 et 2019.



SOURCE : PAULL ET AL. (2022). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

De nombreuses formes de relief peuvent être associées au pergélisol sous-marin. On trouve dans certaines zones du plateau de l'océan Arctique des formes semblables à des pingos terrestres, dont la taille et la forme sont similaires, et qui peuvent contenir de la glace de sol. On les trouve dans certaines zones du plateau continental de l'océan Arctique. Ces volcans de boue sont formés par le déplacement de sédiments, de fluides et de gaz jusqu'au fond de la mer. Ils peuvent atteindre 40 mètres de haut et plus de 500 mètres de diamètre. L'environnement unique créé par les volcans de boue abrite une communauté rare de vers tubicoles dans la mer de Beaufort. On peut observer des rigoles sur le fond marin dans les zones où des gaz ont été récemment libérés.

Des relevés bathymétriques de haute résolution effectués dans la mer de Beaufort canadienne ont permis de découvrir de grandes dépressions nouvellement créées sur le fond marin, à environ 180 kilomètres au large et dans des eaux d'une profondeur de 120 à 150 mètres. La plus grande dépression a une profondeur de 29 mètres, une longueur de 225 mètres et une largeur de 95 mètres. On pense que ces dépressions sont le résultat du dégel du pergélisol, à l'instar des effondrements et des cratères qui se forment sur la terre ferme. Alors que le changement climatique est un facteur de dégel du pergélisol sur terre, les données limitées sur la température des fonds marins dans cette région ne montrent pas de réchauffement. On pense plutôt que ces changements sont le résultat de la chaleur contenue dans les eaux souterraines qui se déplacent lentement sous le pergélisol.

Selon les estimations actuelles, environ 2 800 milliards de tonnes de carbone organique se sont accumulées dans le pergélisol sous-marin au cours des 450 000 dernières années. Cela représente plus de deux fois la quantité de carbone organique sur terre (estimée entre 1 460 et 1 600 milliards de tonnes) et plus de quatre fois le carbone présent dans notre atmosphère. On ne sait toutefois pas s'il sera décomposé par les microbes assez facilement ou rapidement pour avoir un effet climatique d'une telle ampleur.

Dans et sous le pergélisol sous-marin se trouvent des hydrates de gaz, une forme solide de gaz et d'eau. Les molécules d'hydrates de gaz sont constituées de molécules de gaz, généralement du méthane, à l'intérieur d'une cage de molécules d'eau. Le méthane peut provenir de dépôts profonds de pétrole et d'autres hydrocarbures ou d'une ancienne activité microbienne. Les hydrates de gaz ne sont stables qu'à haute pression, par exemple sous le plancher océanique, et à très basse température.

Bien que les hydrates de gaz suscitent de l'intérêt en tant que future source d'énergie, ils représentent une source potentiellement importante de gaz à effet de serre. Si les hydrates de méthane se déstabilisent, ils libèreront plus de 160 fois leur volume de méthane, l'un des gaz à effet de serre les plus puissants. On ne sait pas exactement quelle quantité d'hydrates de gaz se trouve dans le pergélisol sous-marin, mais une estimation prudente fait état de 20 milliards de tonnes de carbone. Il est également nécessaire de produire de meilleures estimations de la quantité de méthane présente sous forme de gaz libre dans les sédiments.

Le pergélisol agit comme une barrière empêchant les gaz d'atteindre la surface. Si des gaz sont libérés, par exemple, des gisements de pétrole situés en profondeur, ils sont piégés par le pergélisol sous-marin lorsqu'ils remontent dans les sédiments. Mais lorsque le pergélisol sous-marin dégèle, il commence à libérer le dioxyde de carbone et le méthane piégés qui peuvent atteindre l'atmosphère, contribuant ainsi au réchauffement de la planète.



© Katie Orlinsky

Frissons arctiques

Impacts du pergélisol

Chaleur ressentie

Impacts du dégel du pergélisol sur les infrastructures

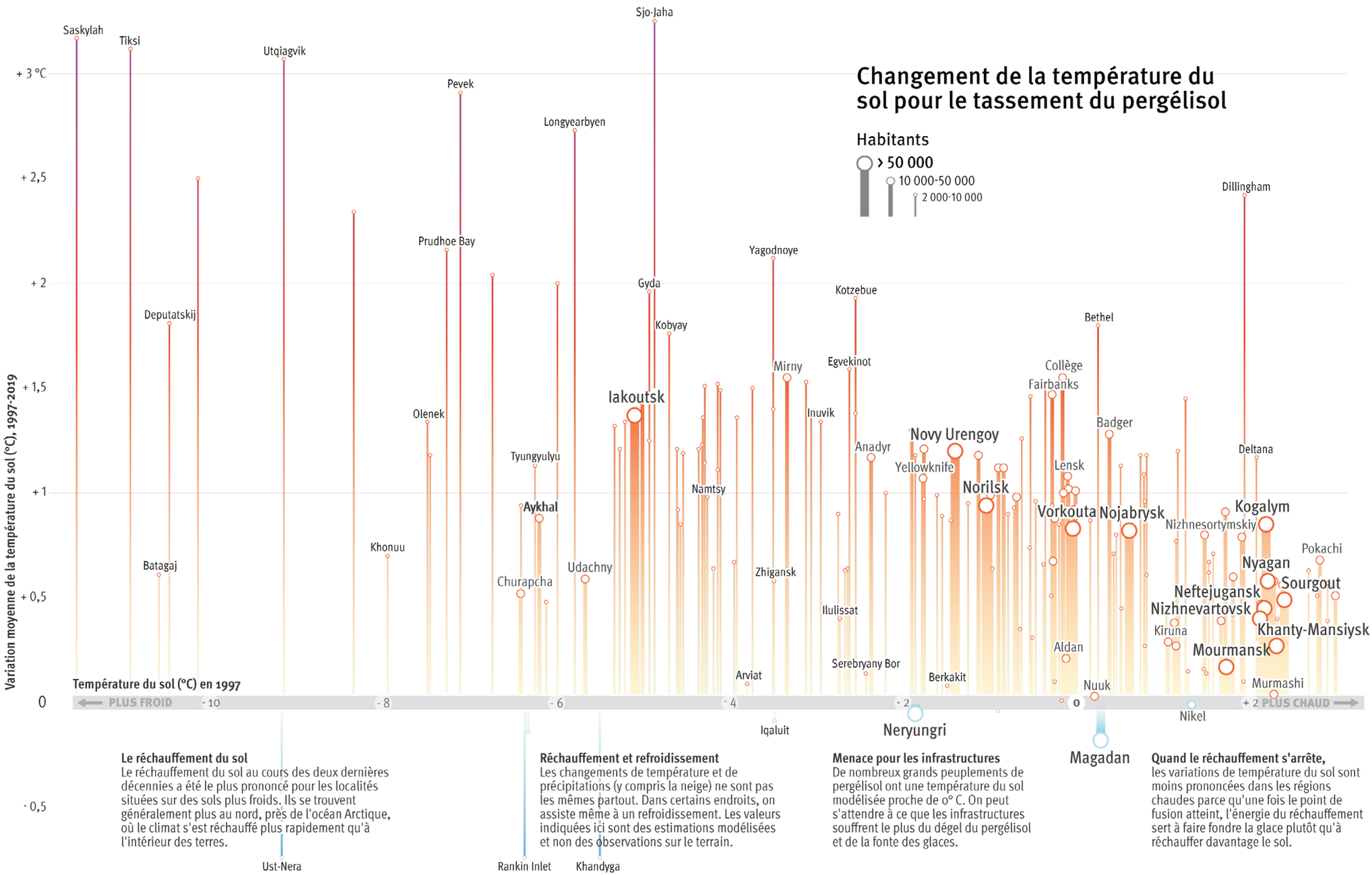
Le pergélisol a toujours représenté un défi technique pour les infrastructures. Les établissements humains, les installations industrielles et les réseaux de transport, de communication et d'énergie ont tous besoin d'une surface stable pour fonctionner. Lorsque l'infrastructure repose sur le pergélisol, la construction doit s'adapter au dégel annuel de la couche active afin de garantir la sécurité des structures sans perturber l'équilibre thermique du sol gelé. Le simple fait d'ériger une structure directement sur le pergélisol peut générer une chaleur localisée, et augmenter le dégel tout en diminuant la capacité portante du sol. À mesure que le climat se réchauffe et que le pergélisol se ramollit, les impacts sur les infrastructures peuvent présenter des risques importants pour la sécurité des personnes qui vivent et travaillent dans l'Arctique.

L'ampleur de ce problème est immense : 70 % de toutes les infrastructures résidentielles, industrielles et de transport de l'Arctique se trouvent dans des zones où le dégel du pergélisol proche de la surface est probable d'ici 2060. Actuellement, près de 5 millions de personnes vivent dans 1 150 établissements situés sur le pergélisol, la majorité étant concentrée dans un peu plus de 500 établissements situés dans des zones de pergélisol sporadique. D'ici à 2050, 42 % des 1 150 localités situées sur le pergélisol devraient être privées de pergélisol en raison du dégel, ce qui toucherait environ 3,3 millions de personnes.

Les infrastructures sont plus susceptibles d'être endommagées dans les zones à forte teneur en glace de sol et à dépôts épais de sédiments sensibles au gel, ainsi que dans les zones de « pergélisol chaud » où le dégel du pergélisol est le plus prononcé et où se trouve la plus grande partie des infrastructures. Lorsque le pergélisol dégèle, il peut devenir instable, se déplacer et se réinstaller de manière inégale. Cela peut entraîner un affaissement du sol et une diminution de la capacité portante, ce qui provoque des fissures, des déformations ou l'effondrement de bâtiments, d'oléoducs et d'autres infrastructures. Pour remédier à ce problème, la plupart des infrastructures situées sur le pergélisol ont été construites dans le but de maintenir l'état gelé du sol afin de lui conférer « une résistance au gel ou une capacité portante ». D'autres méthodes de construction sur le pergélisol comprennent le refroidissement actif ou la modification des propriétés du sol avant la construction, notamment par l'excavation du sol en cours de dégel. Une autre option pour refroidir activement le sol est l'insertion de thermosiphons sous terre. Les thermosiphons, comme les réfrigérateurs, sont des échangeurs de chaleur fermés basés sur la circulation d'un flux gaz-liquide. Cette méthode est toutefois coûteuse et n'est donc pas souvent utilisée.

Certains des exemples les plus frappants de dommages causés aux infrastructures par la fonte du pergélisol concernent des bâtiments situés dans l'Arctique russe, où la plupart des infrastructures ont été construites dans le but de maintenir le pergélisol sous-jacent à l'état gelé. Les immeubles d'habitation étaient généralement construits avec un espace aérien ventilé (vide sanitaire) sous des bâtiments surélevés soutenus par des piliers en béton afin d'empêcher la chaleur des bâtiments d'atteindre le sol. Contrairement aux vides sanitaires ouverts où la température du pergélisol est proche de la température moyenne annuelle de l'air, l'air dans les vides sanitaires mal ventilés est plus chaud et réchauffe le pergélisol en dessous. À mesure que le pergélisol se réchauffe dans les agglomérations de l'Arctique, les conséquences d'une mauvaise conception vont s'aggraver. Dans certaines villes russes, comme Vorkouta dans la République des Komis, 80 % des bâtiments subissent aujourd'hui des déformations de leur structure dues au dégel du pergélisol, ainsi qu'à d'autres facteurs tels que la mauvaise qualité de la construction et le manque d'entretien. De nombreux bâtiments ont été abandonnés ou démolis parce qu'ils sont dangereux à vivre ou parce que les défaillances structurelles rendent impossible la conservation de la chaleur intérieure pendant les hivers froids.

Les infrastructures linéaires sont également susceptibles d'être endommagées par les modifications du pergélisol. En été, par exemple, les routes peuvent s'affaisser en raison du dégel du pergélisol et de la perte de portance des sédiments à grains fins. En hiver, le soulèvement par le gel peut provoquer des ornières, des bosses, des fissures et des nids-de-poule importants sur les routes, ce qui nécessite un entretien constant et un nouveau revêtement. Les eaux souterraines peuvent également s'infiltrer dans les remblais situés sous les routes, ce qui augmente la température du sol et entraîne une dégradation supplémentaire du pergélisol. Les pipelines, les voies ferrées et les pistes d'aéroport sont confrontés à des problèmes similaires. Les lignes de chemin de fer exigent souvent un entretien coûteux. La nécessité de maintenir de faibles pentes signifie qu'elles sont généralement situées dans des zones de plaine où la teneur en glace de sol est souvent élevée.



Le réchauffement du sol
Le réchauffement du sol au cours des deux dernières décennies a été le plus prononcé pour les localités situées sur des sols plus froids. Ils se trouvent généralement plus au nord, près de l'océan Arctique, où le climat s'est réchauffé plus rapidement qu'à l'intérieur des terres.

Réchauffement et refroidissement
Les changements de température et de précipitations (y compris la neige) ne sont pas les mêmes partout. Dans certains endroits, on assiste même à un refroidissement. Les valeurs indiquées ici sont des estimations modélisées et non des observations sur le terrain.

Menace pour les infrastructures
De nombreux grands peuplements de pergélisol ont une température du sol modélisée proche de 0° C. On peut s'attendre à ce que les infrastructures souffrent le plus du dégel du pergélisol et de la fonte des glaces.

Quand le réchauffement s'arrête,
les variations de température du sol sont moins prononcées dans les régions chaudes parce qu'une fois le point de fusion atteint, l'énergie du réchauffement sert à faire fondre la glace plutôt qu'à réchauffer davantage le sol.

SOURCE: RAMAGE ET AL. (2021); OBU ET AL. (2021). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Une activité à risque I

Arctique nord-américain et Kalaallit Nunaat (Groenland)

Peu peuplées, les régions pergélisolées d'Amérique du Nord et du Kalaallit Nunaat (Groenland) représentent un peu moins de 8 % de la population totale de l'Arctique pergélisolé. Ces régions se caractérisent par de petites maisons individuelles et des installations administratives et industrielles relativement légères. Les bâtiments représentent de loin l'infrastructure dominante dans ces régions. Le réseau routier canadien représente une part importante de la valeur des infrastructures, mais à l'exception des autoroutes du sud des Territoires du Nord-Ouest et du Yukon, et de la route reliant Dawson à Inuvik et Tuktoyaktuk, le réseau se limite à des routes locales dans des communautés individuelles. En raison de ces restrictions, les communautés éloignées de l'Alaska, du nord du Canada et de Kalaallit Nunaat dépendent des ports et des aéroports.

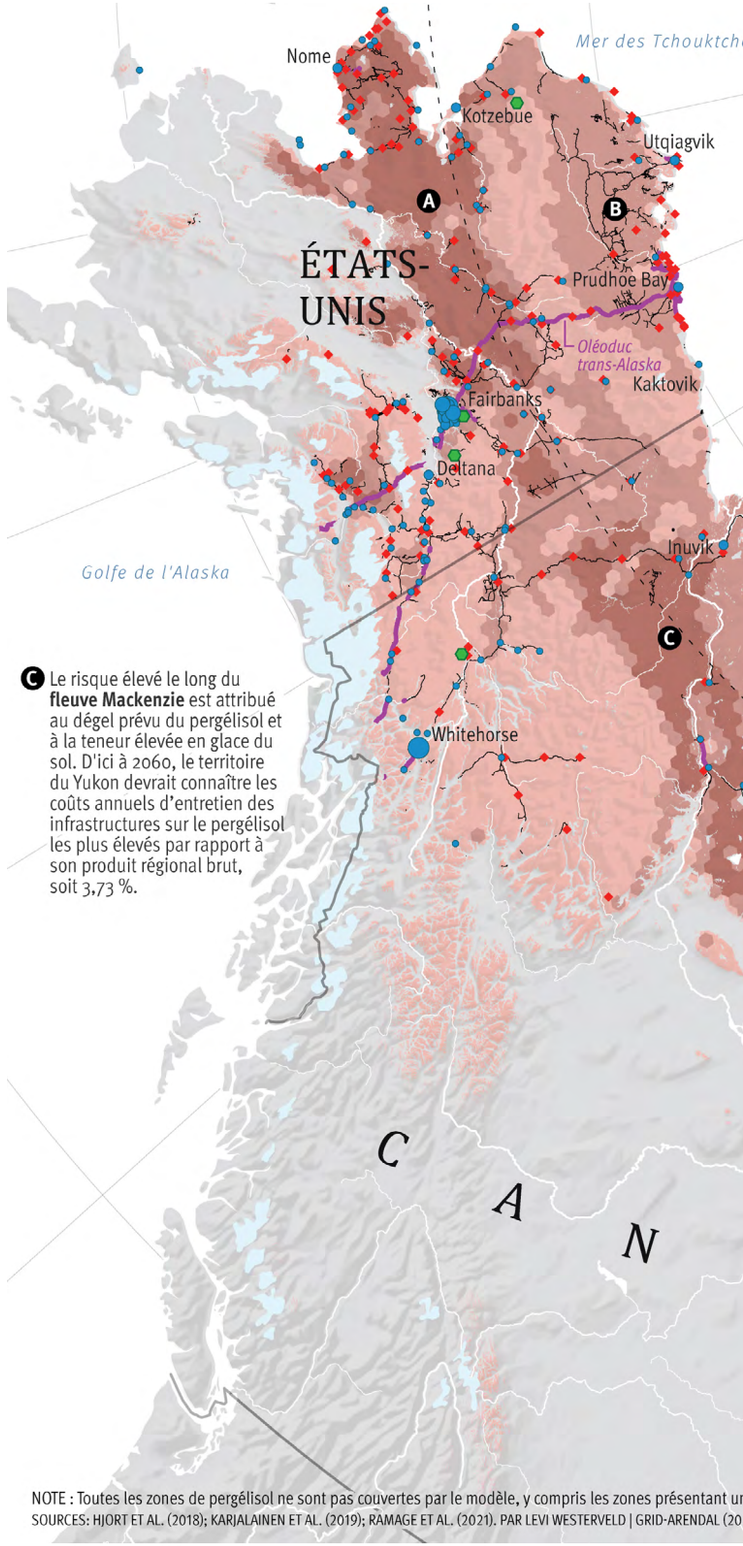
En Alaska, le pergélisol représente 80 % de la surface terrestre. Les plus grands risques à court terme au cours des prochaines décennies concernent les infrastructures dans la zone de pergélisol discontinu de l'intérieur (centre et ouest) de l'État. Les températures moyennes annuelles de l'intérieur de l'Alaska se situent actuellement autour de -2 °C. D'ici 2050, elles devraient augmenter à +2 °C, ce qui indique que le pergélisol de cette région se dégradera activement.

Au Canada, le pergélisol recouvre environ 50% de la surface du sol, principalement dans l'Arctique. De nombreuses communautés de l'Arctique canadien sont situées sur des côtes d'émersion. Ces anciens dépôts marins soulevés contiennent du pergélisol salin, dont la capacité portante est réduite. Dans tout le pays, une grande partie des infrastructures résidentielles, institutionnelles, industrielles et de transport ont été construites sur du pergélisol sensible, c'est-à-dire des zones où le pergélisol est plus chaud et riche en glace. Dans le contexte du changement climatique, les Territoires du Nord-Ouest, le Nunatsiavut, le Nunavik et le Nunavut sont confrontés aux défis généralisés de la dégradation des infrastructures, à l'augmentation des besoins d'entretien et à la nécessité impérieuse de s'adapter.

Au Kalaallit Nunaat, la plus grande partie du sol qui n'est pas un substrat rocheux ou qui n'est pas recouvert de glace intérieure est exposée au dégel du pergélisol. Alors que la plupart des maisons et des bâtiments du pays sont construits sur le socle rocheux, les routes et les aéroports reposent sur le pergélisol, ce qui les rend plus vulnérables que toute autre partie des infrastructures du Kalaallit Nunaat.

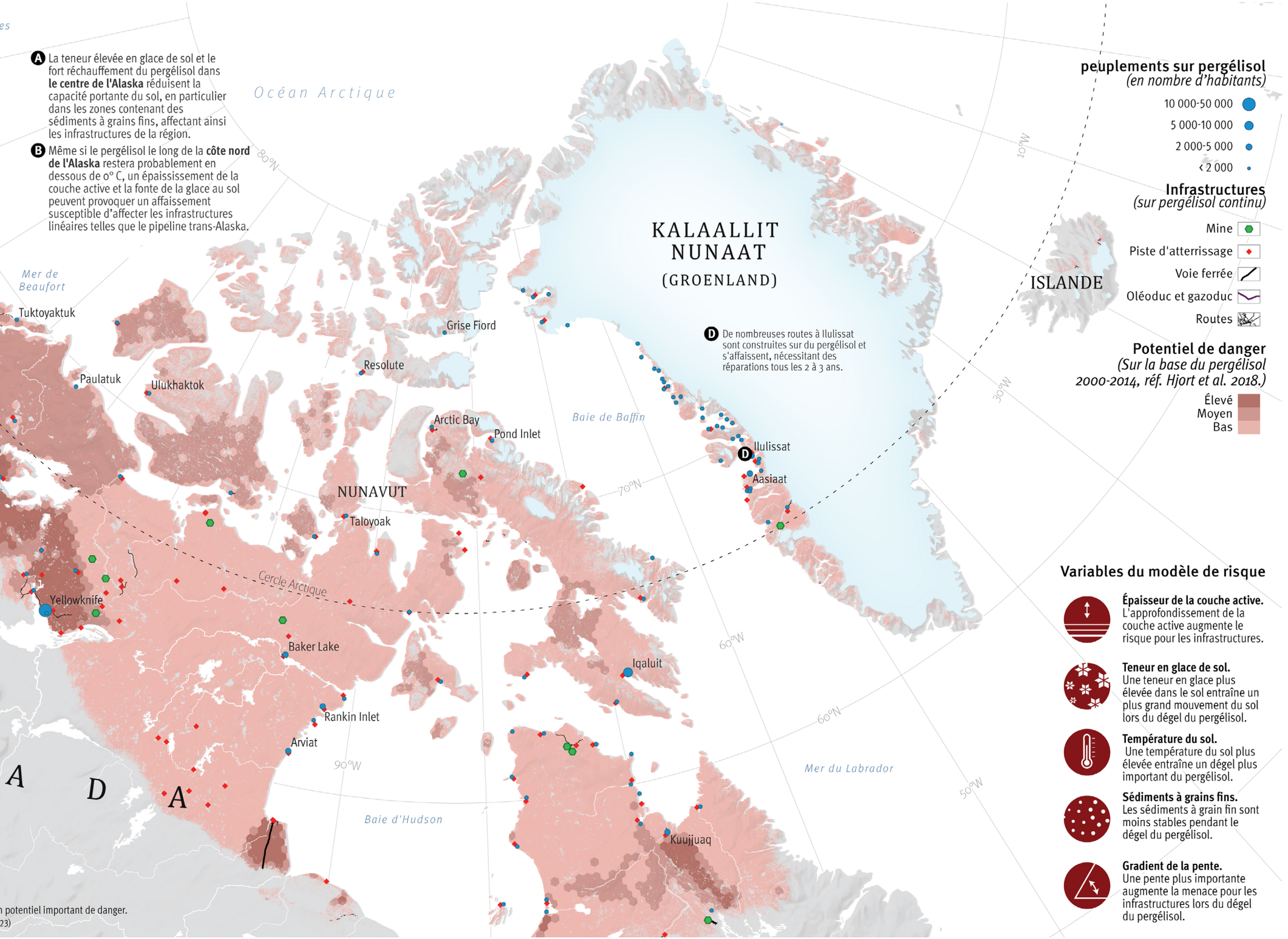
Dans ces trois régions où le pergélisol est déjà en train de dégeler, les infrastructures ont besoin d'être constamment entretenues et réparées. Ces besoins augmentent, que ce soit pour les pistes d'atterrissage ou pour les routes telles que la route de l'Alaska au Yukon, la route de Dempster (Yukon, Territoires du Nord-Ouest) et la nouvelle route Inuvik-Tuktoyaktuk (Territoires du Nord-Ouest).

La dégradation du pergélisol a un coût élevé : l'impact économique estimé des dommages causés aux infrastructures dans l'Arctique circumpolaire dans ces régions devrait dépasser 276 milliards de dollars américains au cours des 40 prochaines années dans le cadre d'un scénario à fortes émissions. À l'avenir, les infrastructures devraient avoir une durée de vie plus courte ou coûter plus cher à entretenir. D'ici 2060, on estime que les coûts globaux augmenteront d'un tiers en Alaska et au Canada (données non disponibles pour le Kalaallit Nunaat), les pipelines ayant les coûts globaux de cycle de vie les plus élevés (60 % d'augmentation des coûts d'ici 2060), suivis par les routes, les chemins de fer, les aéroports (environ 40 % chacun) et les bâtiments (12 %).



C Le risque élevé le long du **fleuve Mackenzie** est attribué au dégel prévu du pergélisol et à la teneur élevée en glace du sol. D'ici à 2060, le territoire du Yukon devrait connaître les coûts annuels d'entretien des infrastructures sur le pergélisol les plus élevés par rapport à son produit régional brut, soit 3,73 %.

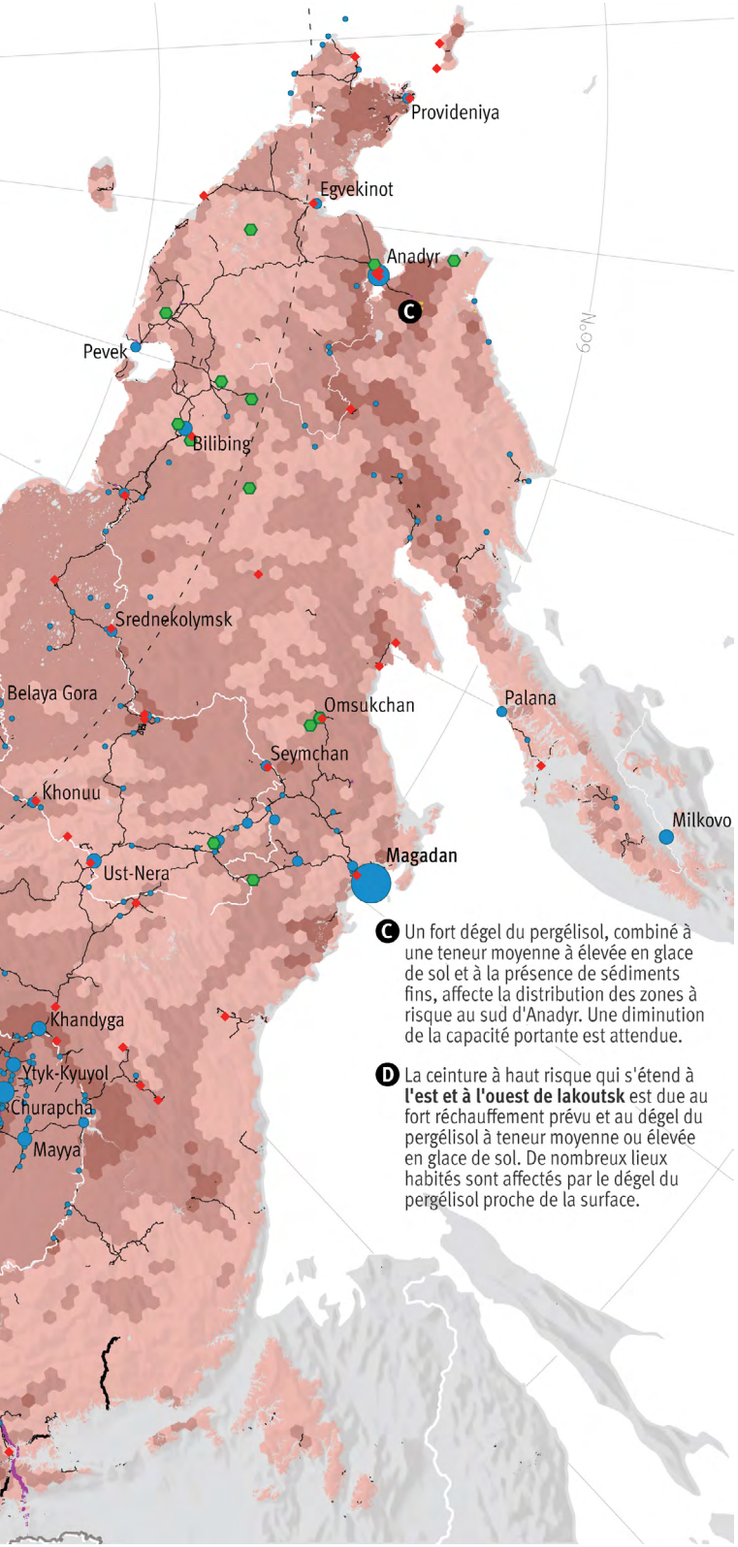
NOTE : Toutes les zones de pergélisol ne sont pas couvertes par le modèle, y compris les zones présentant un
SOURCES: HJORT ET AL. (2018); KARJALAINEN ET AL. (2019); RAMAGE ET AL. (2021). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (20


A La teneur élevée en glace de sol et le fort réchauffement du pergélisol dans **le centre de l'Alaska** réduisent la capacité portante du sol, en particulier dans les zones contenant des sédiments à grains fins, affectant ainsi les infrastructures de la région.
B Même si le pergélisol le long de la **côte nord de l'Alaska** restera probablement en dessous de 0° C, un épaississement de la couche active et la fonte de la glace au sol peuvent provoquer un affaissement susceptible d'affecter les infrastructures linéaires telles que le pipeline trans-Alaska.
Océan Arctique
80°W
Mer de Beaufort
Tuktoyaktuk
Paulatuk
Ulukhaktok
Grise Fiord
Resolute
KALAALLIT NUNAAT (GROENLAND)
D De nombreuses routes à Ilulissat sont construites sur du pergélisol et s'affaissent, nécessitant des réparations tous les 2 à 3 ans.
ISLANDE
10°W
30°W
Baie de Baffin
Arctic Bay
Pond Inlet
Ilulissat
Aasiaat
NUNAVUT
70°N
Taloyoak
Cercle Arctique
Yellowknife
Baker Lake
Iqaluit
60°W
60°N
Rankin Inlet
Arviat
90°W
Mer du Labrador
50°W
Baie d'Hudson
Kuujjuaq
A D A
n potentiel important de danger.
23)
peuplements sur pergélisol
(en nombre d'habitants)
10 000-50 000
5 000-10 000
2 000-5 000
< 2 000
Infrastructures
(sur pergélisol continu)
Mine
Piste d'atterrissage
Voie ferrée
Oléoduc et gazoduc
Routes
Potentiel de danger
(Sur la base du pergélisol 2000-2014, réf. Hjort et al. 2018.)
Élevé
Moyen
Bas
Variables du modèle de risque
Épaisseur de la couche active. L'approfondissement de la couche active augmente le risque pour les infrastructures.
Teneur en glace de sol. Une teneur en glace plus élevée dans le sol entraîne un plus grand mouvement du sol lors du dégel du pergélisol.
Température du sol. Une température du sol plus élevée entraîne un dégel plus important du pergélisol.
Sédiments à grains fins. Les sédiments à grain fin sont moins stables pendant le dégel du pergélisol.
Gradient de la pente. Une pente plus importante augmente la menace pour les infrastructures lors du dégel du pergélisol.



NOTE : Toutes les zones de pergélisol ne sont pas couvertes par le modèle, y compris les zones présentant un potentiel de risque important.

SOURCES: HJORT ET AL. (2018); KARJALAINEN ET AL. (2019); RAMAGE ET AL. (2021). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



Affaires à risque II

La Fédération de Russie et l'arctique scandinave

C'est probablement la Russie qui subira les conséquences les plus graves du dégel du pergélisol. Ce pays possède non seulement le plus grand nombre d'établissements humains dans l'Arctique, mais aussi le plus grand pourcentage d'établissements situés sur le pergélisol (60% de tous les établissements de l'Arctique et 90% de tous les habitants de l'Arctique, respectivement).

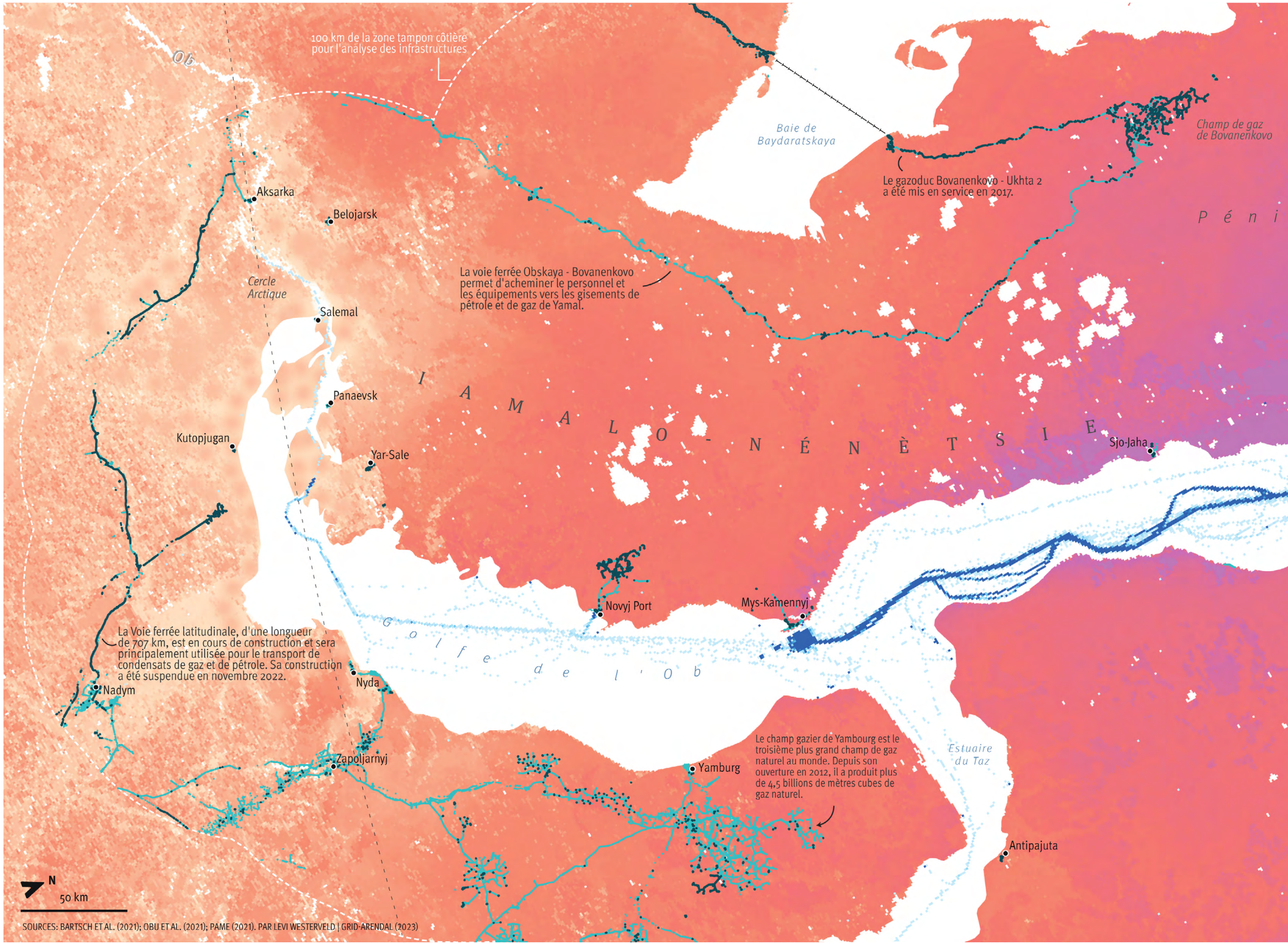
L'Arctique russe est également plus urbanisé et industrialisé, englobant les grandes villes de Norilsk, Vorkouta et Iakoutsk, qui se caractérisent par de grands immeubles d'habitation, des réseaux centralisés de chauffage et de services publics, et de grandes installations industrielles. Les zones à haut risque en Russie comprennent les parties nord-ouest de l'Oural ainsi que le nord-ouest et le centre de la Sibérie.

Les défaillances des infrastructures sont déjà très fréquentes dans l'Arctique russe : au début des années 2000, on estimait que 10% des structures des villes de Norilsk et de Iakoutsk et 80% des structures de Vorkouta avaient subi une forme ou une autre de déformation. Tous les dommages causés aux infrastructures ne peuvent cependant pas être directement imputés au dégel du pergélisol. L'effondrement de l'Union soviétique et la détérioration des conditions socio-économiques dans les années qui ont suivi ont entraîné le démantèlement des infrastructures de surveillance du pergélisol. Parmi les autres facteurs, citons la mauvaise conception et construction des bâtiments, le manque d'entretien et le vieillissement des infrastructures, de nombreux bâtiments étant utilisés au-delà de leur durée de vie prévue. Les conséquences sont notamment l'infiltration d'eau chaude dans le pergélisol à cause de tuyaux de chauffage cassés, un mauvais drainage et la formation d'étangs, ainsi que la faible résistance au gel et au dégel des pieux de fondation en béton.

L'infrastructure urbaine sur le pergélisol présente de nombreux défis en raison de la complexité des conditions du sol sous-jacent et de des infrastructures situéez au-dessus (bâtiments, routes, lignes électriques, services publics souterrains, etc.) Les urbanistes russes ont appliqué l'un des deux principes suivants : la méthode passive, qui consiste à maintenir le pergélisol dans son état de congélation, ou la prise en compte du dégel dans la conception. Dans certaines villes, cependant, les codes de construction ont été enfreints et ces deux principes ont été appliqués dans le même quartier. À Vorkouta, par exemple, des réseaux de plomberie et de chauffage ont été installés sous ou à proximité de bâtiments construits selon la méthode passive. Ces zones ont connu un dégel important du pergélisol et une déformation des bâtiments.

Indépendamment de l'histoire, le dégel continu du pergélisol nuit à la capacité portante du sol sous-jacent, ce qui continuera à poser de graves problèmes pour les bâtiments et autres infrastructures à l'avenir. Dans le nord-ouest de la Sibérie, la fonte du pergélisol a déjà réduit la capacité portante de 17 % en moyenne. D'ici 2050, les infrastructures des villes d'Anadyr, Norilsk, Salekhard et Iakoutsk devraient perdre entre 20 et 30 % de leur capacité portante dans le cadre d'un scénario à fortes émissions de gaz à effet de serre.

Dans les pays scandinaves (Finlande, Norvège et Suède), les infrastructures situées sur le pergélisol ont été beaucoup moins endommagées qu'en Amérique du Nord et dans l'Arctique russe, en partie parce que la teneur en glace de sol est plus faible et que moins d'infrastructures sont situées sur le pergélisol, mais aussi parce que les investissements et l'entretien ont été plus importants.



SOURCES: BARTSCH ET AL. (2021); OBU ET AL. (2021); PAME (2021). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



Terre instable I

Infrastructures côtières dans les en Iamalo-Nénètsie

Les infrastructures côtières de l'Arctique sont exposées aux effets de la fonte du pergélisol et de l'érosion côtière accrue qui accompagne la disparition de la glace de mer. Il est donc important de cartographier les infrastructures côtières de l'Arctique et le type de pergélisol sur lequel elles sont construites pour comprendre les impacts potentiels futurs et fournir de meilleures évaluations des risques.

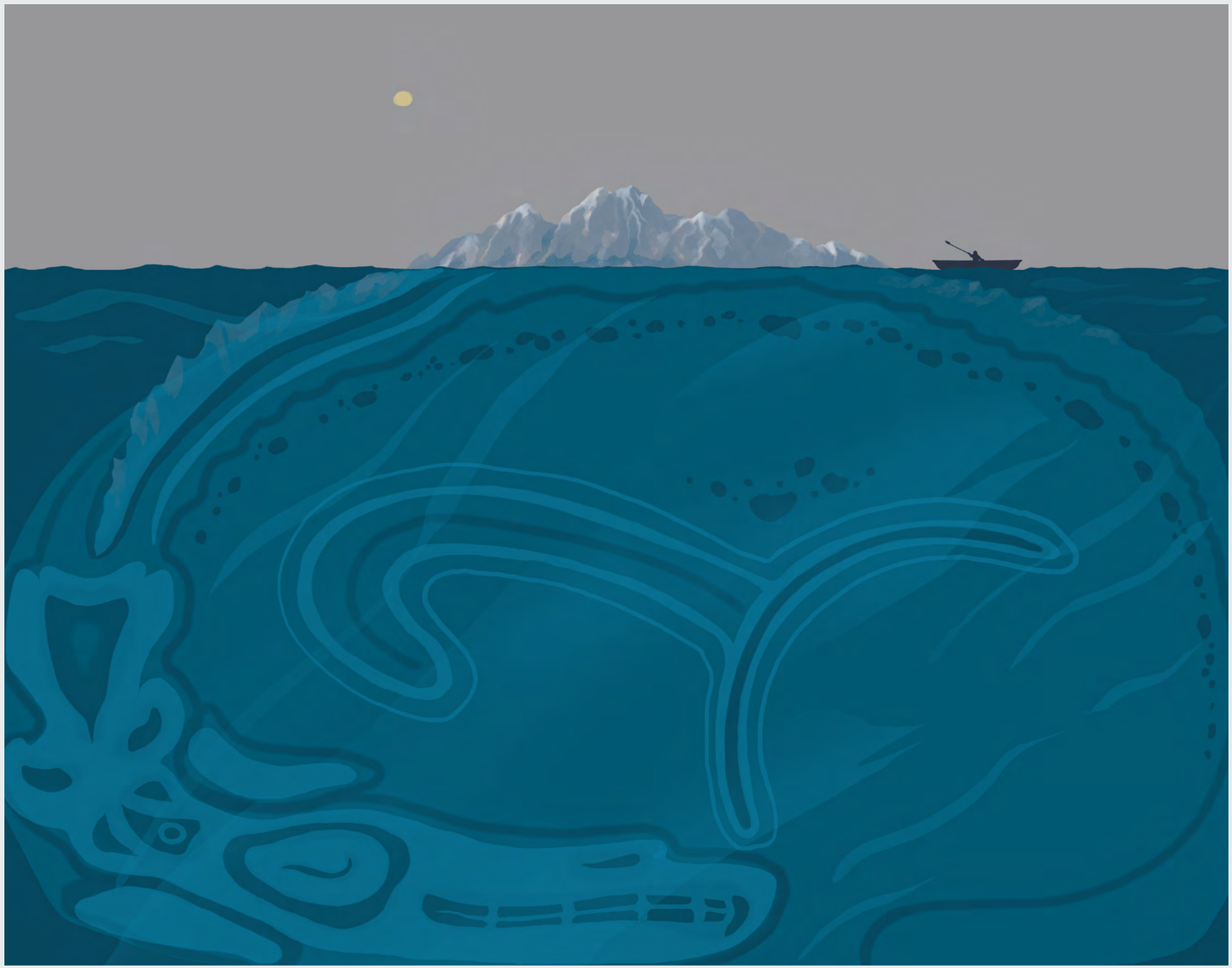
En 2021, des données satellitaires ont été utilisées pour la première évaluation panarctique des infrastructures côtières situées sur du pergélisol continu ou discontinu. L'évaluation définit les zones côtières comme étant situées à moins de 100 kilomètres du littoral. Les données à haute résolution des missions Copernicus Sentinel 1 et Sentinel 2 ont été combinées avec des mesures de l'indice de végétation par différence normalisée provenant de l'imagerie Landsat, afin d'identifier comment les empreintes humaines dans l'Arctique ont évolué au cours des deux dernières décennies.

Sur les quelque 6,2 millions de km² de côtes de l'Arctique affectées par le pergélisol (selon la définition ci-dessus), environ 0,02 %, soit 1 243 km², sont touchés par des infrastructures humaines. La Russie a de loin la plus grande empreinte d'infrastructurescôtières sur le pergélisol, suivie par le Canada et les États-Unis. La plupart de ces infrastructures sont liées à l'exploitation du pétrole et du gaz et aux activités minières. L'empreinte de l'infrastructure a augmenté de 15 % depuis 2000, dont la majorité est liée à l'exploitation du pétrole et du gaz, ce qui souligne la poursuite du développement industriel dans les régions côtières.

La région autonome de Iamalo-Nénètsie est l'une des régions industrielles côtières de l'Arctique russe qui ne cesse de se développer. Plus grande province gazière du monde, la région représente plus de 80 % de la production russe de gaz naturel et environ 10 % de celle de pétrole. Cette région revêt une importance considérable pour l'économie russe et, malgré les défis posés par la construction sur le pergélisol, elle abrite plusieurs mégaprojets industriels récemment achevés ou en cours de réalisation. Il s'agit notamment de la construction et de l'expansion du gisement de gaz de Bovanenkovo et de l'infrastructure ferroviaire et de pipeline qui l'accompagne, ainsi que du projet de chemin de fer latitudinal du Nord.

Le champ gazier de Bovanenkovo est l'un des plus anciens champs gaziers de l'Arctique. Sa découverte est contemporaine à celle de Prudhoe Bay, en Alaska, mais la production à grande échelle n'a commencé qu'en 2012. Il est construit sur un terrain vallonné reposant sur un pergélisol continu riche en glace de 140 à 230 mètres d'épaisseur et composé de limon humide et de limon argileux. Les problèmes liés à la fonte du pergélisol sont bien connus dans cette région. Il s'agit notamment des glissements de terrain, qui résultent de la combinaison de la pluie et du dégel du pergélisol sous-jacent, et de la fonte de la glace souterraine, qui entraîne une saturation en eau et le détachement de la couche active vers le bas de la pente.

Le champ gazier de Bovanenkovo est également l'une des régions de l'Arctique russe les mieux étudiées en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre provenant du pergélisol. On sait que la région contient des hydrates de gaz métastables (reliques) à l'intérieur du pergélisol (également connus sous le nom de pergélisol contenant des hydrates). La modélisation suggère que les émissions de méthane (un puissant gaz à effet de serre) provenant de ce champ gazier pourraient atteindre entre 400 et 500 milliers de mètres cubes sur une période de 30 ans, en l'absence d'isolation thermique dans les puits de production.



© Olga Borjon-Privé (Oluko)

PORTRAIT ÉTUDIANTE EN DOCTORAT, UNIVERSITÉ DE VIENNE, AUTRICHE

Susanna Gartler

La raison pour laquelle j'ai fini par vivre et travailler dans l'Arctique, alors que je suis oiriginaire d'Europe centrale, est que je me suis concentrée sur le terme « subsistance » pendant mes études de master. Cela m'a amenée à m'intéresser à l'Alaska et à l'Arctique en général, où la subsistance est un concept important. Je vis actuellement à Inuvik, à l'intersection de la région de peuplement des Inuvialuit et des territoires traditionnels de la Première nation Gwich'in, où je mène des entretiens avec les usagers des terres et les détenteurs de savoirs autochtones. J'aime l'aspect du magnifique delta du fleuve Mackenzie, avec tous ces lacs et ces rivières, et la côte arctique. Parfois, lorsque je me promène et que je regarde autour de moi pendant un coucher de soleil, je me dis : « Wow, c'est la plus belle chose que j'ai jamais vue. »

Et il ne s'agit pas seulement de la terre, mais aussi des plantes et des animaux. Mais le plus important, ce sont les gens. Je suis fascinée par les cultures, en particulier celles des Premières nations et des Inuits, et par la façon dont les gens les préservent et les chérissent. Je trouve ces cultures et ces sociétés vraiment magnifiques : les philosophies, les arts, l'artisanat, les structures de gouvernance, les récits. Il est également très intéressant de voir comment l'environnement est raconté ici. J'essaie de voir ce que les histoires et les philosophies indigènes peuvent nous apprendre sur la façon de bien vivre avec tous les autres êtres qui nous entourent.

Si vous ne considérez la terre que sous l'angle de ses propriétés physiques,vous passez à côté d'une grande partie de l'importance du pergélisol. Le pergélisol est littéralement le fondement de la vie ici. J'ai été surprise de constater à quel point le pergélisol est diversifié. C'est une sorte de créature vivante, qui respire et se déplace. En été, lorsque le sol se brisait dans la toundra, on pouvait voir qu'à peine un demi-mètre sous la terre se trouvait une couche de glace pure. Cela m'a bouleversée, car j'ai réalisé à quel point cette couche était vulnérable. Lorsque vous réalisez que vous et toutes les personnes qui vous entourent vivez sur l'eau, vous comprenez à quel point il est important que cet environnement reste suffisamment froid.

Je pense qu'une partie de la contribution des sciences sociales consiste à faire passer ce message : le pergélisol ne devrait pas être intéressant uniquement parce qu'il contient beaucoup de méthane et de carbone, mais aussi parce qu'il est l'habitat de personnes qui y vivent depuis des millénaires. En tant qu'anthropologue, je suis formée pour parler à des gens qui viennent de systèmes de connaissances différents, et nous avons la capacité de jeter un pont entre différents mondes sociaux et culturels. Le projet Nunataryuk est très interdisciplinaire. Nous avons organisé des ateliers auxquels les membres de la communauté ont participé et apporté leur contribution, tout en travaillant avec des spécialistes des sciences naturelles, de la santé et de l'ingénierie, qui ont une grande connaissance de nos différents sites de terrain.

Je suis très sceptique à l'idée d'apporter ma propre vision et de l'imposer à un endroit que je connais à peine, par rapport aux personnes qui y ont vécu toute leur vie, même si j'ai fait beaucoup d'études au préalable. Cependant, j'ai le sentiment que tant que mes recherches sont guidées principalement par les besoins locaux, c'est une bonne chose. Nous collaborons étroitement avec différentes organisations et gouvernements ici, et nous veillons à ce que nos résultats ne soient pas seulement repris et publiés dans des articles scientifiques, mais aussi mis à la disposition des personnes avec lesquelles nous développons ces connaissances. Les anciens autochtones m'ont souvent dit que nous devions relever ensemble les grands défis de notre époque, une notion qui me motive vraiment.

Terre instable II

Renforcement des pistes d'atterrissage à Paulatuk

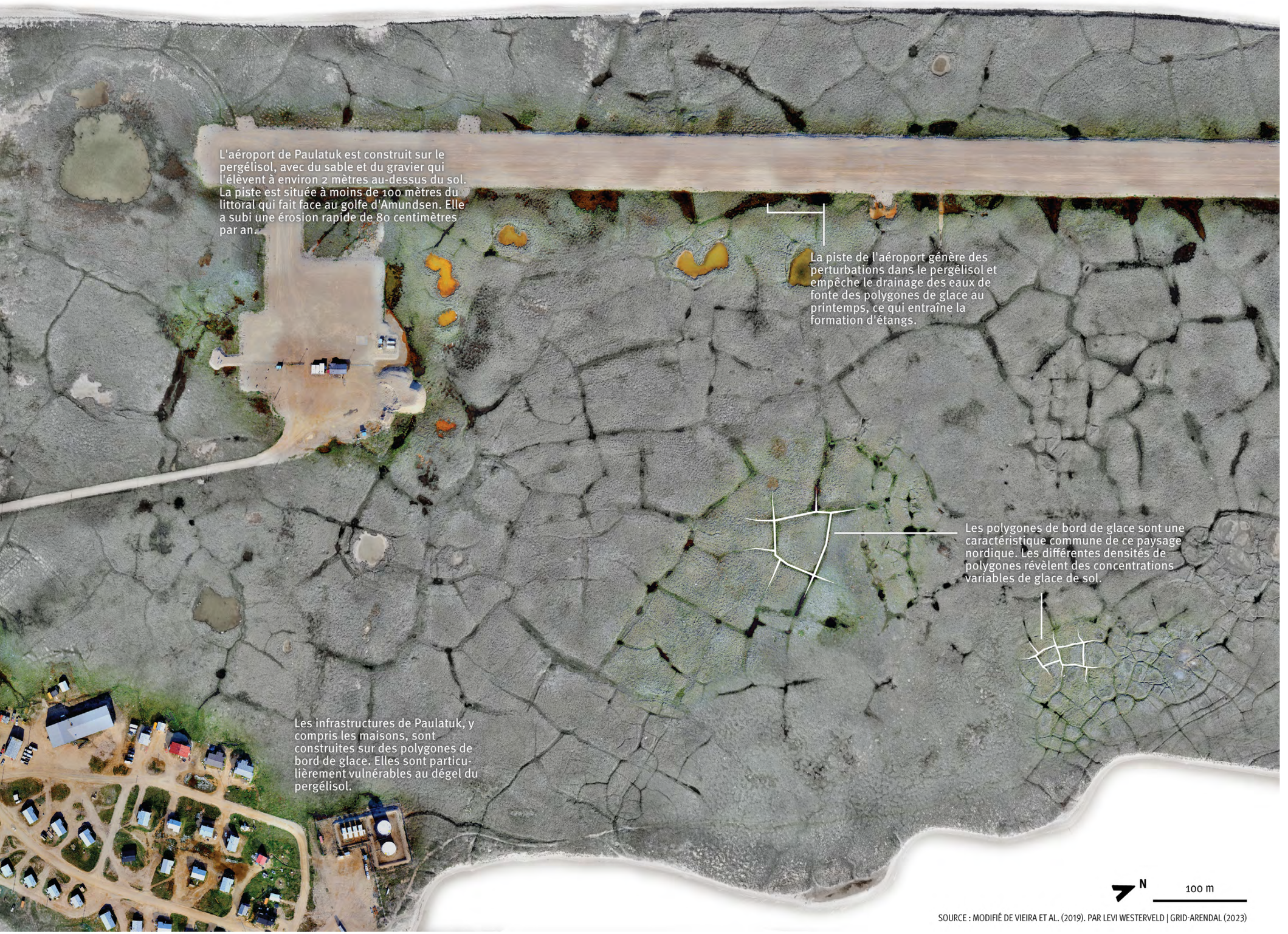
Paulatuk, un petit village côtier inuvialuit d'environ 265 habitants, est situé sur les rives de la baie de Darnley, dans le golfe d'Amundsen en mer de Beaufort, dans les Territoires du Nord-Ouest, au Canada. Comme de nombreuses communautés côtières de l'Arctique, Paulatuk est confrontée aux effets de l'érosion côtière et du dégel du pergélisol. Située sur une péninsule basse dont l'altitude moyenne n'est que de 3,2 mètres au-dessus du niveau de la mer, sa côte occidentale subit une érosion rapide. Entre 1993 et 2020, le littoral a reculé de 40 à 80 centimètres par an. La ville se trouve également dans une zone de pergélisol continu dominée par des polygones de bordures de glace, qui sont particulièrement vulnérables au dégel du pergélisol. Cela signifie que toutes ses infrastructures, y compris les habitations, risquent d'être endommagées ou de s'effondrer, car le réchauffement climatique entraîne une érosion accrue du pergélisol sous-jacent à l'agglomération.

Comme de nombreuses communautés du nord du Canada et de l'Arctique, Paulatuk n'est pas accessible par la route. Elle dépend donc des transports aériens et maritimes pour relier les personnes et les marchandises au reste du pays et à l'étranger. Le transport maritime d'été, qui est le seul moyen de transporter des articles très volumineux ou très lourds vers la communauté, n'est disponible que pendant la saison sans glace dans le golfe d'Amundsen. Le transport aérien, disponible toute l'année, est donc vital pour des communautés comme Paulatuk.

Les aéroports, situés sur le pergélisol, comptent parmi les biens les plus précieux de l'Arctique et sont considérés comme des infrastructures essentielles pour les communautés. Le Canada exploite à lui seul plus de 85 aéroports dans le Nord, dont la plupart ont des pistes en gravier non revêtues qui peuvent s'affaiblir considérablement après des périodes de fortes précipitations ou de dégel printanier.

L'aéroport de Paulatuk est situé à moins de 4 mètres au-dessus du niveau de la mer, construit sur des polygones de glace et situé à 100 mètres du littoral en érosion. La subsidence causée par le dégel du pergélisol menace de rompre la berme construite pour protéger la piste d'atterrissage. Cela pourrait entraîner des inondations dans une dépression adjacente située à l'angle sud-ouest de la piste d'atterrissage, ce qui pourrait créer des problèmes d'érosion. L'aéroport et d'autres infrastructures peuvent également empêcher les eaux de fonte des polygones de lisière de glace de s'écouler au printemps. Les mares qui en résultent peuvent endommager la piste et les talus et retarder le regel de la couche active en automne. En outre, la faible altitude et l'emplacement de la piste d'atterrissage la soumettent aux impacts de tempêtes plus intenses, de l'élévation du niveau de la mer et de l'érosion côtière. Les communautés arctiques isolées telles que Paulatuk ne peuvent se permettre de rompre ce lien essentiel et ont besoin de solutions pour faire face aux menaces posées par le changement climatique.

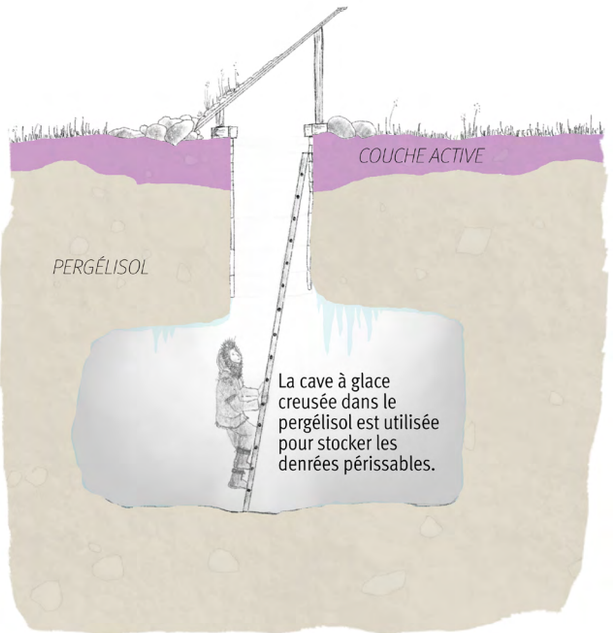




SOURCE : MODIFIÉ DE VIEIRA ET AL. (2019). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Terre instable III

Garder les aliments froids en Alaska

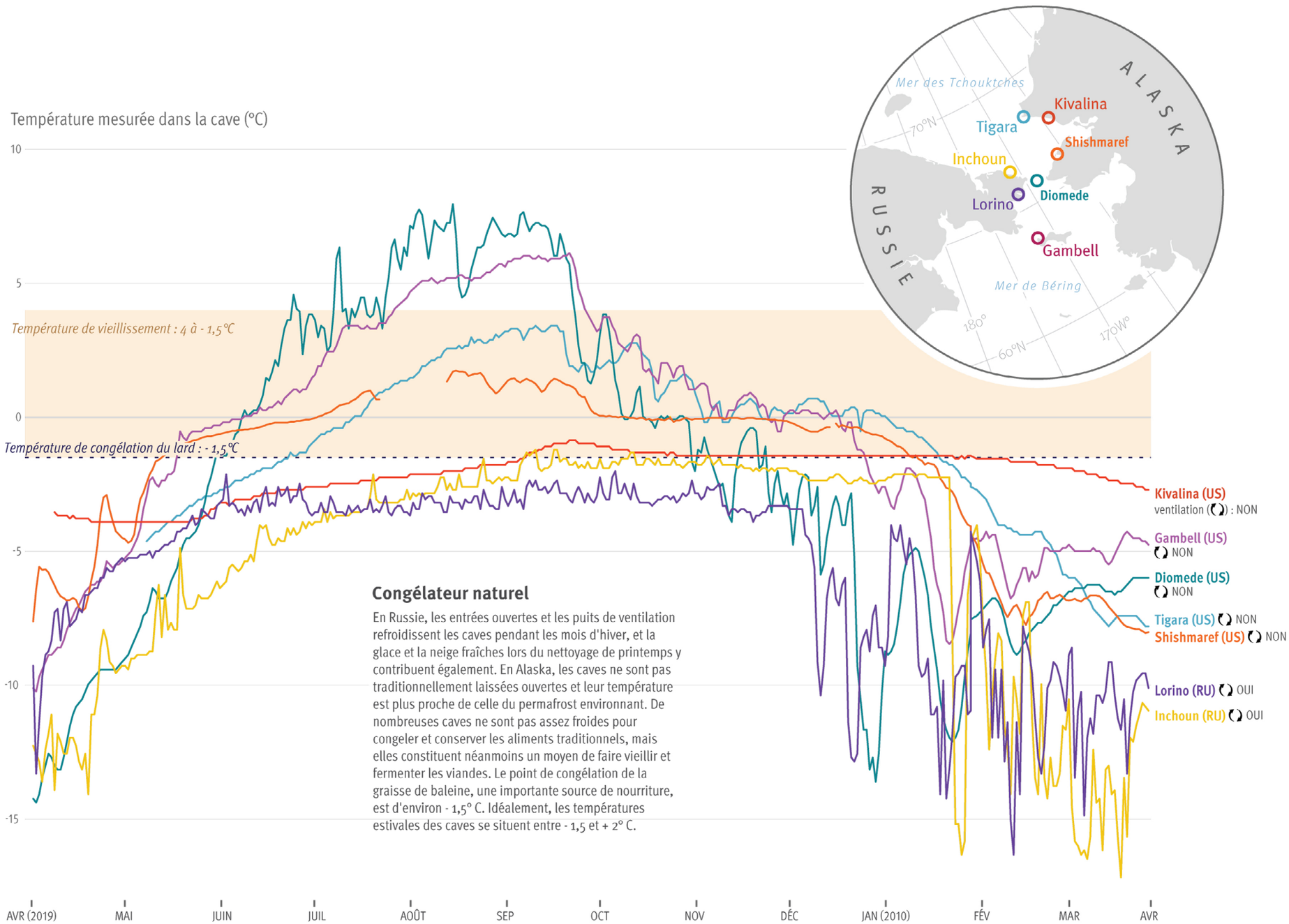


Les caves à glace sont une forme de technologie autochtone arctique qui tire parti du pergélisol pour assurer la réfrigération naturelle des aliments tout au long de l'année. On les trouve dans les communautés Iñupiat de l'extrême nord de l'Alaska et dans certaines parties de l'Arctique canadien et russe. Outre le fait qu'elles constituent une solution économique pour conserver la viande, elles jouent un rôle important dans l'identité culturelle autochtone, car elles sont le fruit d'une transmission des connaissances en matière de conservation des aliments d'une génération à l'autre.

Sur le versant nord de l'Alaska, les caves à glace sont de formes et de tailles diverses, mais elles offrent en moyenne un espace de 10 mètres cubes. En règle générale, elles sont dotées d'un puits de 1 à 6 mètres de profondeur, de sorte que le plafond de la cave se trouve bien en dessous de la couche active du pergélisol, sont accessibles par une trappe ou un abri en bois construit au-dessus de l'entrée. La grande taille des caves permet de stocker non seulement le gibier d'eau, les phoques et les caribous, mais aussi la viande de baleine, qui nécessite plus d'espace pour des périodes de stockage plus longues. Bien que les températures dans les caves à glace n'atteignent pas les -18 °C recommandés par le Département de l'agriculture des États-Unis pour la conservation de la viande, elles permettent à la viande de mâturer en toute sécurité et de créer un goût particulier qui est culturellement préféré.

L'avenir des caves à glace de Tikiġaq (Point Hope) et d'Utqiaġvik (anciennement Barrow) en Alaska suscite des inquiétudes en raison de leur récente dégradation. Il existait au moins 50 caves à glace à Tikiġaq, alors qu'il n'en resterait plus que 20 aujourd'hui. Une tendance similaire se produit à Utqiaġvik, où de nombreuses caves à glace sont abandonnées ou considérées comme peu fiables. Ce déclin a été attribué à diverses raisons, notamment l'impossibilité d'accéder aux caves en toute sécurité, la présence de moisissures dans les caves, l'éclatement ou le fléchissement du bois recouvrant les caves, les mares d'eau, l'infiltration d'eau salée, la perte de cohésion des sédiments et la défaillance dite catastrophique lorsque les caves sont inondées ou s'effondrent sur elles-mêmes.

Les caves à glace d'Utqiaġvik ont fait l'objet d'une étude de dix ans entre 2005 et 2015. Cette étude a révélé que les températures sont restées relativement stables au cours de la période étudiée, avec des températures annuelles moyennes allant de -7,8 à -6,4 °C. Bien qu'elles soient plus chaudes que la température constante de -11 °C rapportée environ un siècle plus tôt, les chercheurs ont souligné d'autres facteurs contributifs possibles, en plus de la fonte du pergélisol, qui pourraient avoir un impact négatif sur les caves à glace. Il s'agit notamment des conditions locales du pergélisol, des changements hydrologiques, de l'entretien irrégulier ou insuffisant, des facteurs associés au développement urbain et de la redistribution de la neige. La salinité est un facteur important, par exemple, car une teneur élevée en sel peut abaisser le point de congélation de l'eau, ce qui peut diminuer la capacité portante du sol. On pense que les sédiments d'Utqiaġvik ont été déposés dans des conditions marines ou saumâtres. L'utilisation de chasse-neige peut également affecter les propriétés mécaniques des caves : la neige s'accumule souvent sur les caves, ce qui isole le sol et réchauffe les caves souterraines, tandis que les bancs de neige laissés au printemps peuvent générer de grandes quantités d'eau de fonte qui inondent alors les caves.



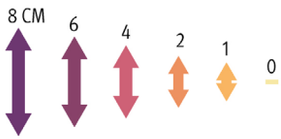
Congélateur naturel

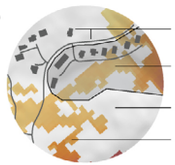
En Russie, les entrées ouvertes et les puits de ventilation refroidissent les caves pendant les mois d'hiver, et la glace et la neige fraîches lors du nettoyage de printemps y contribuent également. En Alaska, les caves ne sont pas traditionnellement laissées ouvertes et leur température est plus proche de celle du permafrost environnant. De nombreuses caves ne sont pas assez froides pour congeler et conserver les aliments traditionnels, mais elles constituent néanmoins un moyen de faire vieillir et fermenter les viandes. Le point de congélation de la graisse de baleine, une importante source de nourriture, est d'environ - 1,5° C. Idéalement, les températures estivales des caves se situent entre - 1,5 et + 2° C.

SOURCE : YOSHIKAWA ET AL. (2022). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Déformation saisonnière de la surface moyenne 2015-2019 (cm par an)

NOTE : déformation vers le bas en été lorsque la couche active dégèle, et déformation vers le haut en hiver lorsqu'elle gèle.







La majeure partie **d'Ilulissat** est construite sur un socle rocheux entouré de sédiments de pergélisol. De nombreuses routes et canalisations reliant les bâtiments ont été endommagées par le dégel du pergélisol. Même une petite déformation de 1 ou 2 cm par an peut entraîner des défaillances dues au pergélisol.

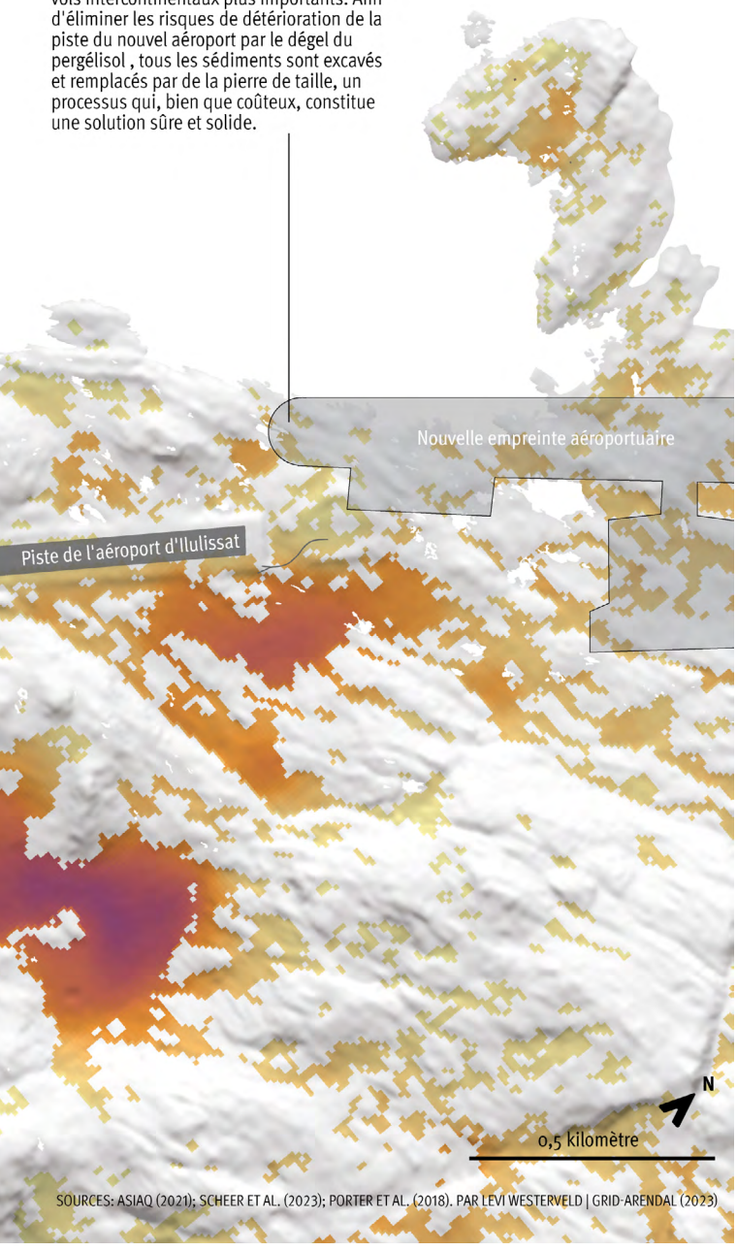
Le réservoir d'eau potable de la ville est alimenté par des lacs situés en amont dans un terrain pergélisolé. Au fur et à mesure que le pergélisol se dégrade, des sédiments à grains fins et des eaux interstitielles salines résiduelles pénètrent dans les masses d'eau. Les conséquences sont inconnues, mais on craint de plus en plus que l'approvisionnement en eau potable ne soit affecté.

Réservoir d'eau

L'isthme du Nord est une nouvelle zone de développement au nord d'Ilulissat, comprenant des bâtiments commerciaux et touristiques, des logements et des bâtiments institutionnels. Des parties de différentes zones chevauchent des sédiments de pergélisol avec des taux de déformation annuels importants. Les forages montrent une teneur en glace très élevée, ce qui indique un risque élevé de grandes déformations permanentes à mesure que le pergélisol se dégrade.

Terre instable IV

Aménagement urbain à Ilulissat



La piste de l'aéroport d'Ilulissat est relativement courte, une nouvelle piste est en cours de construction et pourra accueillir des vols intercontinentaux plus importants. Afin d'éliminer les risques de détérioration de la piste du nouvel aéroport par le dégel du pergélisol , tous les sédiments sont excavés et remplacés par de la pierre de taille, un processus qui, bien que coûteux, constitue une solution sûre et solide.

SOURCES: ASIAQ (2021); SCHEER ET AL. (2023); PORTER ET AL. (2018). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Située sur la côte ouest du pays, Ilulissat est la troisième plus grande ville du Kalaallit Nunaat (Groenland) et un site du patrimoine mondial de l'UNESCO. En tant que première destination touristique du pays, la ville connaît une période d'expansion et de croissance économique. Un nouvel aéroport international est prévu et, avec l'afflux de touristes, il devrait apporter de nouvelles opportunités commerciales à la région. Une nouvelle route d'accès reliant la ville à l'aéroport encouragera également le développement de nouvelles zones urbaines, y compris des parcs d'activités et des zones résidentielles. Mais cette expansion planifiée est confrontée à des défis techniques importants liés au pergélisol. S'ils ne sont pas pris en compte de manière adéquate, ces problèmes pourraient compromettre la nouvelle infrastructure et l'approvisionnement en eau potable d'Ilulissat.

La plupart des communautés du Kalaallit Nunaat sont situées sur des affleurements rocheux, de sorte que la principale préoccupation liée au pergélisol concerne les infrastructures linéaires, telles que les routes et les pipelines qui traversent des bassins sédimentaires. L'agrandissement prévu d'Ilulissat se fera également sur un socle rocheux, mais la piste de l'aéroport (qui mesurera 2 km de long) et les routes qui y mènent reposent sur un pergélisol sédimentaire, qui est extrêmement riche en glace par endroits. Pour le nouvel aéroport, il a été décidé d'excaver complètement les sédiments du pergélisol sous la piste prévue et de les remplacer par d'autres matériaux d'enrochement stables. Pour d'autres infrastructures linéaires, cette option est toutefois trop coûteuse, car le pergélisol riche en glace peut atteindre plusieurs mètres d'épaisseur par endroits.

Les sédiments pergélisolés autour d'Ilulissat ont une teneur en glace extrêmement élevée dans les parties supérieures. Les sédiments plus profonds, déposés à une époque où le niveau relatif de la mer était 50 mètres plus élevé qu'aujourd'hui, ont une forte teneur en sel. Les caractéristiques du pergélisol d'Ilulissat sont telles que, lors de son dégel, sa forte teneur en glace provoque un affaissement du sol, tandis que l'eau interstitielle saline résiduelle amène ces sédiments à des températures aussi basses que -2 °C.

C'est pourquoi les scientifiques aident la municipalité d'Ilulissat dans ses efforts de planification urbaine, en se concentrant sur la compréhension des propriétés du pergélisol dans et autour des bassins sédimentaires de la ville, en particulier en termes de salinité et de teneur en glace. Plusieurs carottes de sédiments, dont les teneurs en glace et en sel varient, ont été prélevées autour d'Ilulissat. Les propriétés des sédiments et la teneur en glace sont analysées en laboratoire, puis différentes charges sont appliquées à chaque échantillon afin de déterminer comment le dégel affecte la déformation de la surface. Les scientifiques peuvent ainsi étudier comment la salinité, la teneur en glace et le dégel influencent les caractéristiques mécaniques des sédiments et le risque qu'ils représentent pour les routes et les autres infrastructures qui les recouvrent. En fin de compte, les scientifiques visent à développer une carte et un cadre d'évaluation qui peuvent informer la municipalité sur les risques de la construction dans différentes zones.

Isolement pernicieux

Santé, bien-être et pergélisol

La vie de nombreuses personnes vivant dans l'Arctique est intimement liée à leur environnement naturel. Alors que le changement climatique s'intensifie, une préoccupation majeure est de savoir comment les changements environnementaux rapides observés dans l'Arctique affectent la santé physique et mentale et le bien-être de ses habitants. L'érosion côtière, la diminution de la glace de mer, les changements météorologiques, le dégel du pergélisol sur terre et sous la mer, ainsi que la modification des aires de répartition et de la distribution de la faune et de la flore se produisent tous à un rythme sans précédent. Il en résulte de nouveaux risques pour la santé et la sécurité, liés aux aléas biologiques et géologiques tels que les effondrements et les incendies de forêt, à la sécurité alimentaire et hydrique, ainsi qu'à l'émergence ou à la réémergence de contaminants et de maladies infectieuses, y compris les zoonoses (maladies qui se transmettent de l'animal à l'homme).

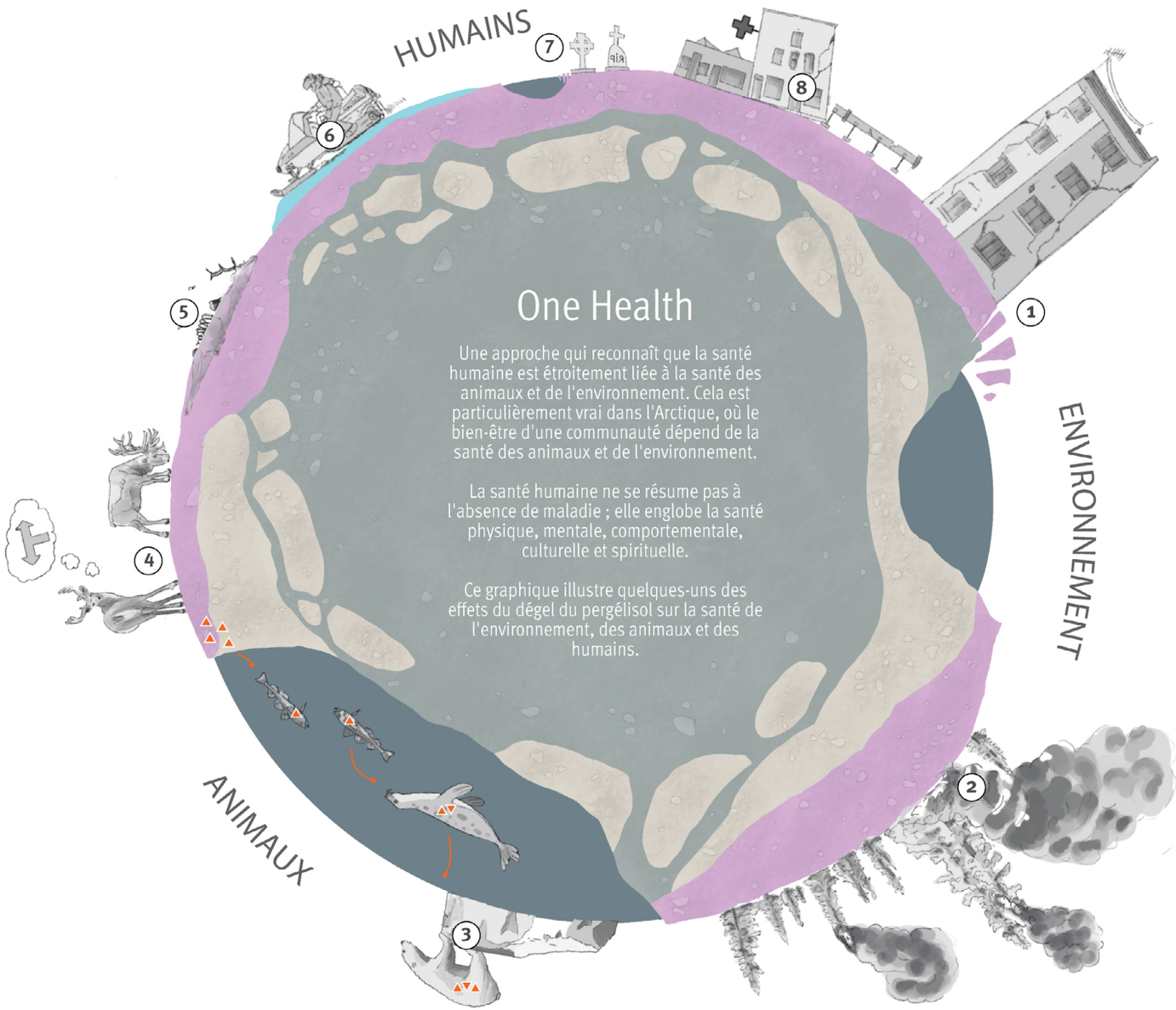
Le changement climatique, parmi d'autres défis, est également reconnu comme ayant un impact sur la santé mentale, le bien-être et la qualité de vie des personnes. Des recherches menées dans la communauté de Rigolet, au Nunatsiavut (Canada), ont révélé que les changements météorologiques, la stabilité de la neige et de la glace, ainsi que les schémas de la faune et de la flore perturbent les activités terrestres, portent atteinte à l'identité culturelle et au réconfort lié au lieu. Cette situation contribue à la dégradation de la santé mentale et du bien-être, ainsi qu'à des sentiments d'impuissance et de perte de contrôle. Ces facteurs peuvent entraîner une augmentation du stress familial, une plus grande probabilité de consommation de drogues et d'alcool et des pensées suicidaires.

Comprendre les implications sanitaires de l'évolution rapide de l'environnement dans l'Arctique nécessite une approche holistique. Le projet One Health (« Une seule santé ») reconnaît que la santé humaine est liée à la santé environnementale et animale. Elle nécessite une collaboration entre diverses disciplines, y compris les sciences naturelles et sociales et les systèmes de connaissances, afin d'identifier les risques et de prévenir et gérer les risques pour la santé des humains, des animaux et de l'environnement qu'ils partagent.

L'approche One Health reconnaît et cherche également à inclure les connaissances traditionnelles et indigènes comme une forme de connaissance. Les communautés indigènes ont leurs propres visions de la santé et du bien-être, qui sont très souvent fondées sur le lien étroit qui les unit à la terre et à la communauté. Au Nunavut, par exemple, la langue inuktitut véhicule une diversité de points de vue sur la santé, dont l'Inuusiqatiginniq (la façon d'être d'une personne). Il s'agit généralement d'une vision holistique du bien-être qui prend en compte le milieu environnant, les comportements individuels et les relations avec les autres.

One Health et d'autres approches similaires sont maintenant mobilisées pour comprendre comment le dégel du pergélisol affecte la santé et le bien-être de l'homme. La dégradation du pergélisol peut avoir plusieurs conséquences directes et indirectes sur l'être humain, les animaux, l'environnement et leurs interactions. Une étude menée dans le nord-ouest de l'Alaska a révélé que le dégel du pergélisol réduit la sécurité de l'eau et de la nourriture, ce qui entraîne une augmentation du stress mental. La communauté de Point Hope/Tikigaq, par exemple, tire son eau d'un petit lac de toundra situé au-dessus du pergélisol. La hausse des températures estivales a toutefois entraîné une prolifération d'algues et d'autres organismes biologiques, y compris des moustiques, ce qui oblige à changer les filtres à eau jusqu'à 50 fois par jour, au lieu des quatre habituelles, afin de maintenir la qualité de l'eau potable. De même, à Tikigaq et à Kivalina, de nombreuses caves à glace traditionnelles dégèlent désormais en été, rendant la viande et la graisse de baleine boréale et de béluga récoltées impropres à la consommation, ce qui a un impact sur la sécurité alimentaire.

La perception des enjeux de santé liés au dégel du pergélisol varie d'une région à l'autre de l'Arctique. Une étude de cas réalisée dans le nord du Canada a montré que le dégel du pergélisol pose des problèmes pour la poursuite des moyens de subsistance traditionnels, les déplacements sur le territoire et l'entretien des infrastructures. Cela peut également avoir un impact sur l'état de santé des personnes, sur l'équilibre entre vie professionnelle et vie privée et sur leur sentiment d'autonomie. Dans la baie de Disko de Kalaallit Nunaat (Groenland) et au Svalbard, des études ont montré que la fonte du pergélisol n'est pas perçue comme un risque direct pour la santé et le bien-être mental, malgré les impacts reconnus sur la culture et l'environnement bâti, ainsi que sur les risques naturels. Les habitants reconnaissent les problèmes liés au dégel du pergélisol dans tous ces domaines, mais se déclarent tout de même satisfaits de leur bien-être et de leur qualité de vie. Ces résultats suggèrent que la prise de conscience des défis liés au dégel du pergélisol contribue au bien-être général. Bien que ces résultats soient issus d'un nombre relativement limité de participants, ils pourraient être étendus pour aider les communautés à renforcer leur capacité d'adaptation.



ENVIRONNEMENT :

1. Des processus tels que **l'érosion, le soulèvement et l'affaissement des côtes** sont induits par le dégel du pergélisol. Les modifications de l'environnement physique peuvent constituer un risque pour la santé des hommes et des animaux.
2. **La qualité de l'eau et de l'air** est affectée par le dégel du pergélisol. La libération de sédiments et de contaminants dans l'eau en raison de l'érosion et du thermokarst, ainsi que l'augmentation des incendies dans l'Arctique, sont préjudiciables à la santé de l'environnement.

ANIMAUX :

3. Le dégel du pergélisol libère des **contaminants** (▲) tels que le mercure, qui sont transportés par les rivières jusqu'à l'océan Arctique. Ils remontent la chaîne alimentaire et affectent la santé des petits et des grands animaux.
4. **La localisation et les itinéraires de migration** des animaux changent car ils s'adaptent aux changements qui se produisent dans l'environnement, ce qui affecte l'accessibilité de la nourriture pour les humains.
5. Avec l'augmentation des températures, **d'anciens agents pathogènes** peuvent réapparaître, affectant potentiellement la santé des animaux et des humains

HUMAINS :

6. L'accès limité à des animaux sains, les infrastructures de transport endommagées et les installations de stockage des aliments, telles que les caves à glace, peuvent affecter **la sécurité alimentaire et le bien-être des humains.**
7. Le dégel du pergélisol modifie **le paysage culturel** de l'Arctique. Sur les rives et les côtes, des sites importants tels que les cimetières peuvent être érodés et endommagés par les inondations, ce qui affecte le bien-être de l'homme.
8. Les dommages causés aux infrastructures par le dégel du pergélisol peuvent limiter **l'accès à des logements sûrs, à l'eau et aux installations sanitaires, ainsi qu'à d'autres infrastructures institutionnelles et construites par l'homme.**

PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



© Olga Borjon-Privé (Oluko)

PORTRAIT FONDATRICE DU CENTRE DE RECHERCHE EN SANTÉ QAUJIGIARTIIT, IQALUIT, NUNAVUT, CANADA

Gwen Healey Akearok

Je suis née et j'ai grandi à Iqaluit, la capitale du Nunavut, sur la côte sud de l'île de Baffin, juste au sud du cercle polaire. Je suis épidémiologiste, chercheuse en santé communautaire et fondatrice du Qaujigiartiit Health Research Centre. Par mon travail, je cherche à répondre aux préoccupations urgentes de ma communauté en matière de santé et de bien-être.

Je décrirais mon travail au centre de recherche comme étant centré sur le cœur et le relationnel. Nous travaillons de manière très holistique, par exemple en garantissant l'accès à une nourriture qui nous maintient en bonne santé, l'accès à des abris qui nous protègent des intempéries et du froid, et l'accès à des animaux sains que nous récoltons. Tous ces éléments sont interconnectés. Nous entretenons ces relations de manière à promouvoir la santé dans tous ces domaines. Je travaille en collaboration avec tous les membres de la communauté, y compris les anciens, les étudiants et les représentants du gouvernement.

Les personnes extérieures à la communauté, y compris les médias, pensent souvent que la santé mentale et les taux de suicide élevés sont les principaux problèmes des communautés nordiques. Mais ils se penchent rarement sur les causes des problèmes de santé mentale, tels que les antécédents traumatiques et la génération des parents, grands-parents et arrière-grands-parents qui ont été envoyés dans des pensionnats. Le renforcement de la relation entre les membres de la communauté et la terre et le rétablissement des liens avec la langue et la culture ont aidé les membres de la communauté à guérir et à s'engager sur la voie du dépassement des événements traumatisants. Aujourd'hui, les modifications du paysage dues au changement climatique, en particulier les changements dans la migration des différents animaux, sont une source de stress supplémentaire. Les gens parlent de ces préoccupations, de la santé des animaux, de la capacité à récolter. Si vous ne pouvez pas sortir et avoir une relation avec la terre et l'eau, cela peut avoir un impact significatif sur le bien-être mental de nos communautés.

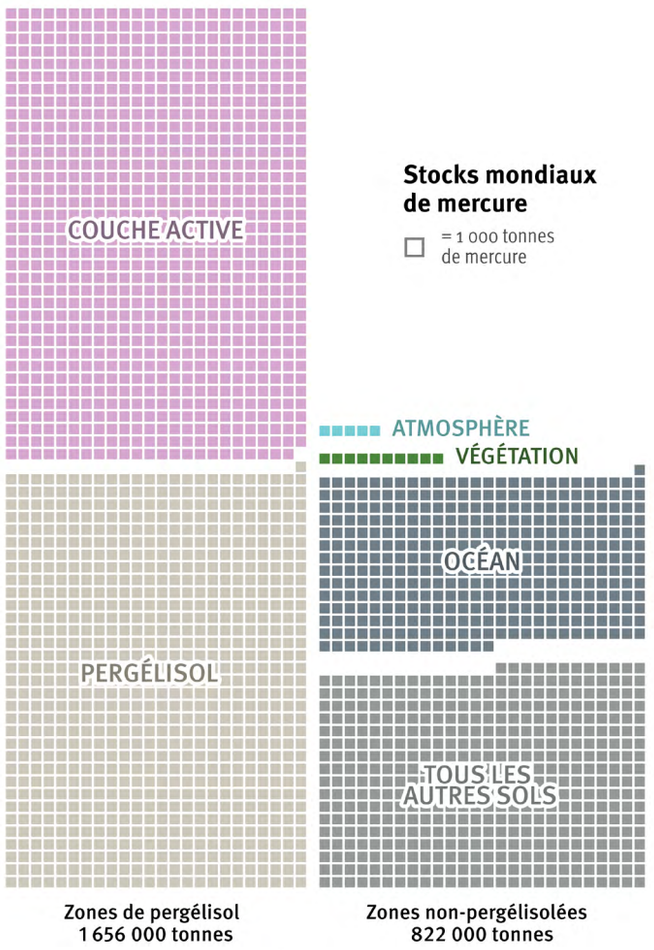
Sur le pergélisol, les dommages causés aux infrastructures constituent l'un des principaux risques pour la santé publique liés au dégel du sol. Nos infrastructures ne peuvent pas faire face aux fluctuations imprévisibles des conditions météorologiques, qui sont indubitablement liées au changement climatique. Nos bâtiments sont construits sur des pieux en acier, directement dans la roche mère et le pergélisol. En cas de fortes pluies, l'eau et le dégel du pergélisol, par exemple, provoquent le déplacement des bâtiments, ce qui peut entraîner l'effondrement des structures. Si nos maisons, nos magasins d'alimentation et toutes les choses dont nous dépendons pour nous abriter et nous nourrir ne tiennent pas debout, c'est un problème de sécurité publique – auquel les gens ne pensent généralement pas.

Je suis également mère, et lorsque je pense aux générations futures, il m'est difficile de ne pas penser à ma propre enfance. Nous pouvions ramper autour des caribous dans la toundra, nous pouvions nous promener et en croiser un. Aujourd'hui, mes enfants n'ont jamais vu de caribou. Il est difficile de ne pas penser à toutes les autres choses qui changeront lorsqu'ils deviendront adultes. En tant que parent, on veut les protéger de tout, mais tout change si vite dans nos communautés qu'il est difficile d'imaginer ce qu'ils pourraient rencontrer. Je reste cependant positive quant à l'avenir, en partie grâce à l'énergie innovante de ma communauté, mais aussi grâce à l'accès accru aux connaissances et aux modes de communication. Toutes nos communautés ont accès à l'internet et à la téléphonie mobile, de sorte que l'accès aux connaissances de la communauté et à l'information est un atout considérable. Je ne doute pas que la future génération sera encore plus créative à l'âge adulte et qu'elle entretiendra des liens à travers l'Arctique qui contribueront à faire avancer les choses pour le bien de tous.

Terrains toxiques

Contaminants et santé environnementale

Les contaminants environnementaux sont des substances chimiques libérées par les activités humaines peuvent avoir des effets néfastes sur les organismes vivants, y compris l'homme. Les contaminants environnementaux présents dans l'Arctique comprennent les métaux lourds, les composés radioactifs, le carbone noir (suie provenant d'incendies, de la navigation ou d'activités industrielles), les plastiques (y compris les microplastiques) et autres produits chimiques synthétiques (y compris les polluants organiques persistants tels que le dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT), les polychlorobiphényles (PCB) et les dioxines). Ces produits chimiques restent stables dans l'environnement pendant longtemps et peuvent se bioaccumuler dans la chaîne alimentaire, ce qui constitue un danger pour la faune et la flore et pour la santé humaine. De nombreux contaminants proviennent de zones plus peuplées et d'activités industrielles situées plus au sud. Les contaminants sont transportés vers le nord par l'air, les rivières et les courants océaniques et se déposent dans l'Arctique où ils sont emprisonnés dans les sédiments de surface, l'eau douce, l'eau de mer, la glace de mer, les glaciers et le pergélisol.



SOURCE : SCHUSTER ET AL. (2018). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

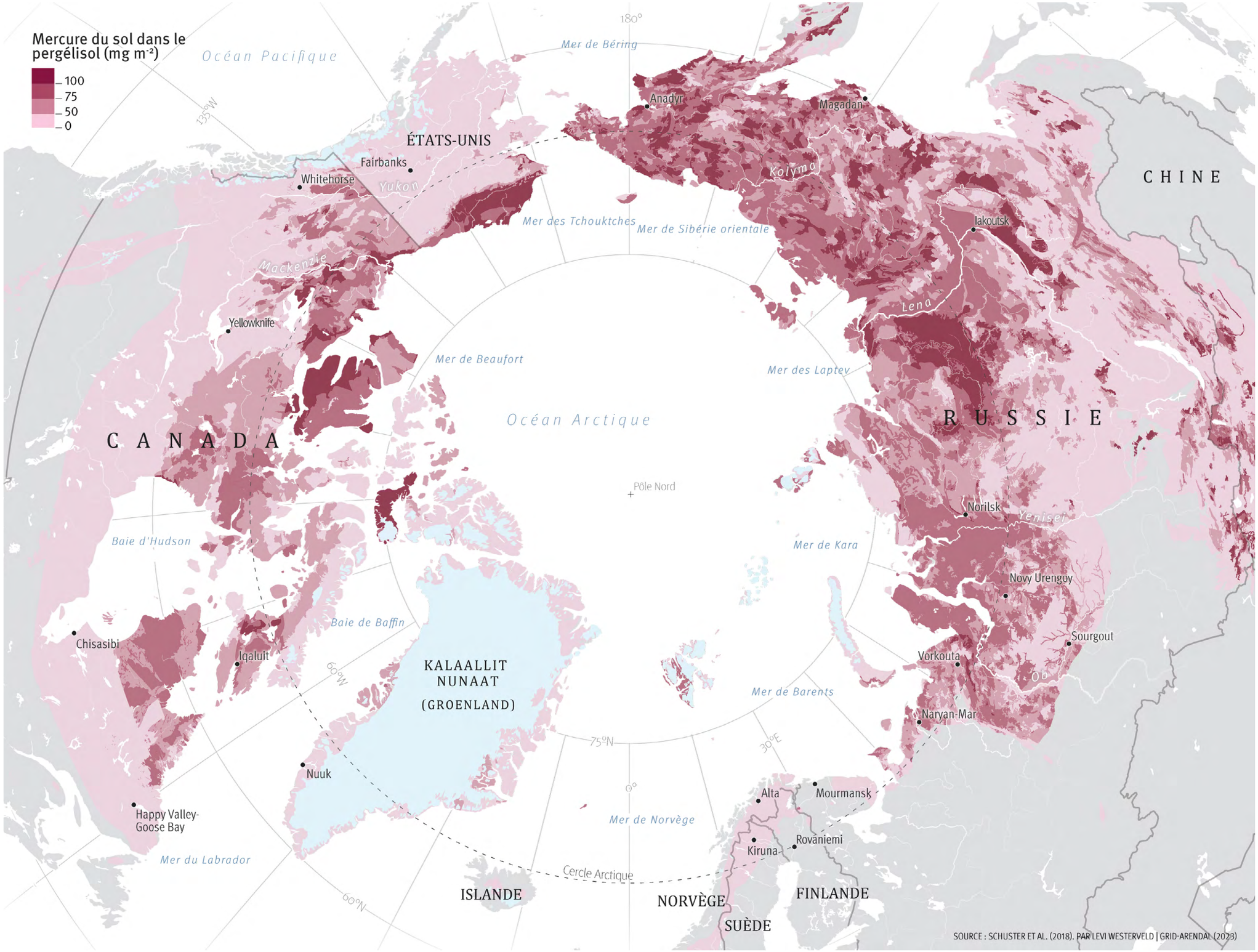
Les sources localisées de contaminants sont également importantes dans certaines régions de l'Arctique, en particulier à l'intérieur et autour des sites industriels tels que les mines et autres industries lourdes. Les contaminants environnementaux issus de ces opérations peuvent inclure des restes de forage et d'exploitation minière, des boues et des fluides de forage, des terrils miniers, des métaux lourds, des carburants déversés et des déchets radioactifs. À mesure que l'empreinte humaine s'accroît dans l'Arctique, on s'attend à ce que les sources locales et à longue distance de contaminants augmentent, y compris les produits chimiques qui suscitent de nouvelles inquiétudes dans l'Arctique, tels que les substances perfluoroalkyées et polyfluoroalkylées (PFAS) et les pesticides utilisés à l'heure actuelle.

Les changements qui se produisent dans la neige, la glace et le pergélisol de l'Arctique soulèvent la question de savoir si ces contaminants, déposés pendant des décennies, peuvent à nouveau être libérés dans l'environnement. L'un des principaux problèmes liés à la fonte du pergélisol est la remobilisation des contaminants précédemment déposés. Les contaminants particulièrement préoccupants sont les polluants organiques persistants tels que les pesticides (par exemple, le DDT) et les produits chimiques industriels tels que les PCB, les retardateurs de flamme ou les substances perfluoroalkyées et polyfluoroalkylées (PFAS).

Le mercure, un composé toxique naturel, est une autre source de préoccupation. Les activités humaines ont modifié le cycle global du mercure et en ont libéré de grandes quantités dans l'air, la terre et l'eau. Les recherches suggèrent que le pergélisol est un très grand réservoir de mercure par rapport à d'autres sols, à l'océan et à l'atmosphère. Toutefois, de nombreuses incertitudes subsistent quant à la quantité de mercure réellement contenue dans le pergélisol. Quoi qu'il en soit, il est largement admis que la dégradation du pergélisol pourrait avoir des conséquences majeures sur la redistribution du mercure dans le monde.

Alors que le dégel du pergélisol met en péril les infrastructures de l'Arctique, on s'inquiète également de l'augmentation de la contamination de l'environnement due aux accidents industriels. Une estimation récente suggère que plus de 10 000 sites contaminés existent sur le pergélisol de l'Arctique. Les projections futures de la dynamique du pergélisol indiquent que jusqu'à un tiers de ces sites pourraient être exposés à la dégradation du pergélisol entre 2050 et 2100, ce qui pourrait à la fois affecter la stabilité des infrastructures industrielles et remobiliser les contaminants. L'impact de l'évolution des conditions du pergélisol sur chaque site dépend toutefois des conditions de l'endroit où il se trouve. Par exemple, dans certains endroits, les sites d'élimination des déchets sont maintenant choisis avec plus de soin et les matériaux du sol sur le site d'élimination peuvent être moins vulnérables aux impacts de la fonte du pergélisol.

La plupart des communautés arctiques éloignées disposent d'installations de gestion des déchets limitées et dépendent de décharges avec brûlage à l'air libre ou de lagunes d'épuration. Si le pergélisol sous ces sites dégèle, il risque de ne plus constituer une barrière entre les sols adjacents, les nappes phréatiques et les sources d'eau.



SOURCE : SCHUSTER ET AL. (2018). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Revenir à la vie

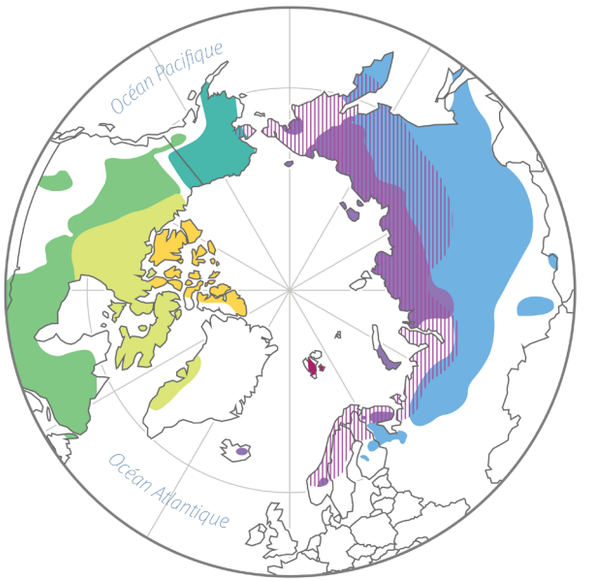
Pathogènes ré-émergents

Depuis la fin du XIXe siècle, les scientifiques savent que le pergélisol abrite des agents pathogènes, des micro-organismes pouvant entraîner des maladies et qui comprennent des virus, des bactéries, des champignons, des parasites et, éventuellement, des prions. Tant que le pergélisol reste gelé, ces organismes demeurent en dormance, parfois pendant des milliers d'années. Lorsque le pergélisol dégèle, ils peuvent entrer en contact avec l'air et l'eau, ainsi qu'avec les animaux et les humains, créant ainsi les conditions nécessaires à la croissance et à la propagation des pathogènes. La libération potentielle de pathogènes due au dégel du pergélisol est de plus en plus préoccupante pour la santé humaine, animale et végétale.

Les pathogènes qui forment des endospores (cellules dormantes) ont de grandes chances de survivre dans des conditions environnementales difficiles et peuvent représenter le plus grand risque lié à la fonte du pergélisol. Il s'agit notamment de champignons pathogènes, des espèces de bactéries *Clostridium* responsables du tétanos et du botulisme, ainsi que la bactérie *Bacillus anthracis*, responsable de la maladie du charbon (anthrax). L'anthrax, une maladie qui touche principalement les ongulés domestiques et sauvages, était autrefois très répandue dans l'Arctique russe jusqu'à ce que des vaccins pour animaux deviennent disponibles. Entre 1897 et 1925, plus de 1,5 million de rennes sont morts d'anthrax, leurs carcasses ayant été enterrées dans des fosses peu profondes. La Russie compte plus de 13 000 de ces sites d'enfouissement, dont plus de la moitié sont situés dans le pergélisol. Une récente épidémie d'anthrax sur la péninsule de Iamal en 2016, qui a entraîné la mort d'un enfant, l'hospitalisation de plus de 20 adultes et la mort de plusieurs milliers de rennes, a été attribuée à la décongélation d'une carcasse de renne enfouie depuis 75 ans dans des conditions exceptionnellement sèches et chaudes. Cette épidémie met en évidence le risque très grave et localisé de l'anthrax pour les humains et les animaux dans certaines régions de l'Arctique, ainsi que le risque pour les moyens de subsistance traditionnels.

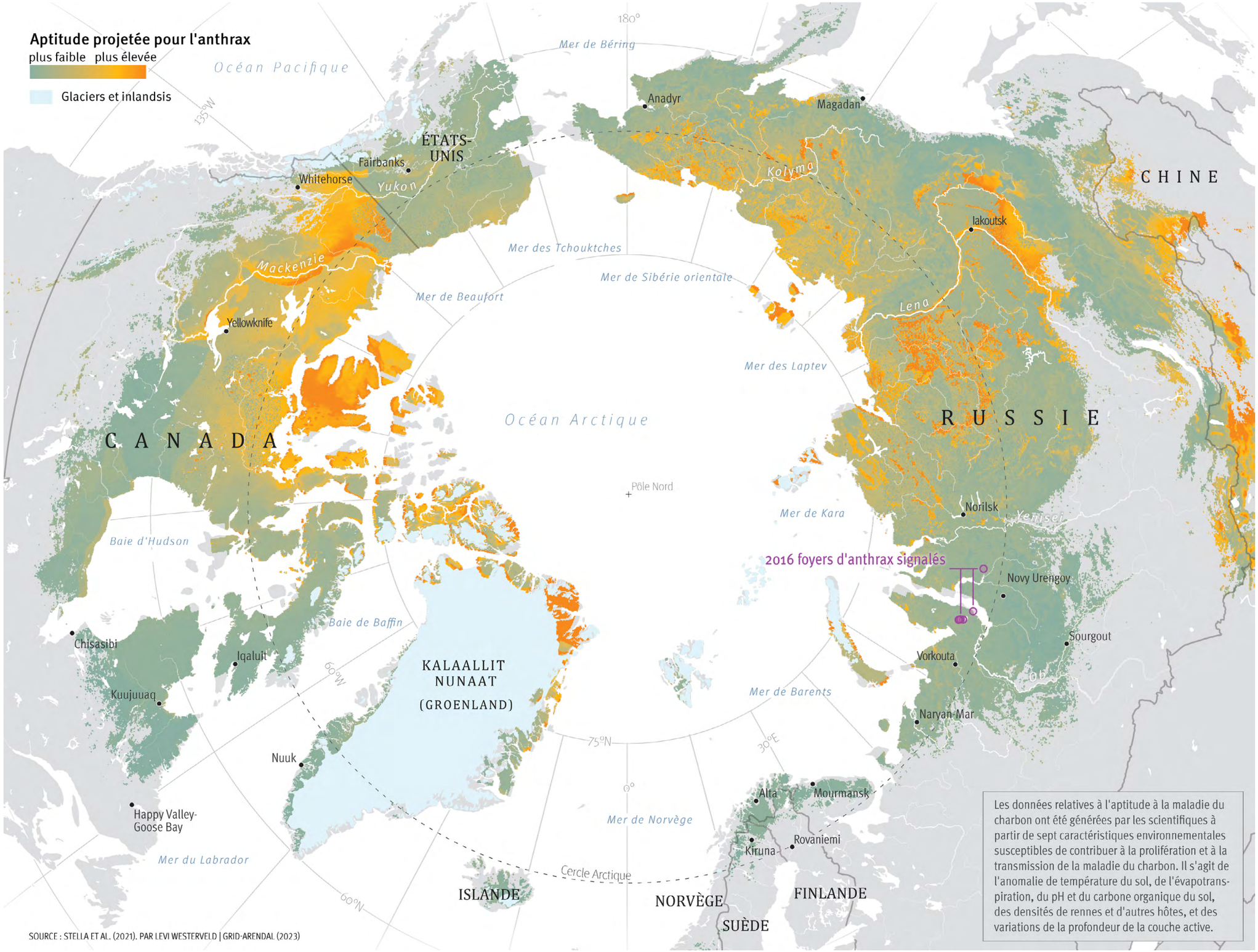
Le dégel du pergélisol entraîne également des changements rapides dans les écosystèmes boréaux, notamment dans la composition des communautés fongiques, un groupe diversifié d'organismes qui comprend les levures, les moisissures et les champignons. Les champignons pathogènes provenant du dégel du pergélisol pourraient être potentiellement dangereux pour la santé humaine, ainsi que pour la sylviculture et l'agriculture. Par exemple, *Hymenoscyphus fraxineus*, un champignon originaire d'Asie qui a dévasté les frênes dans toute l'Europe sur une période de 30 ans, illustre la facilité avec laquelle les champignons pathogènes et d'autres espèces envahissantes se propagent grâce au commerce mondialisé.

Comme l'a démontré la pandémie de COVID-19 (causée par le coronavirus du syndrome respiratoire aigu sévère 2) et la réapparition de la grippe aviaire hautement pathogène A(H5N1), les virus à ARN ont des taux de mutation élevés et peuvent facilement s'adapter à de nouveaux environnements, ce qui en fait un groupe de zoonoses (maladies qui se transmettent entre les animaux et les êtres humains) de plus en plus important. Dans l'Arctique, des fragments d'ARN du virus de la grippe espagnole de 1918 ont été découverts dans des fosses communes de la toundra d'Alaska. En Sibérie, des fragments d'ADN du virus de la variole ont été découverts dans des humains momifiés il y a 300 ans. Le pergélisol abrite d'anciens virus à ADN « géants », qui pourraient être réactivés dans des conditions de dégel du pergélisol, bien que de nombreux de ces « virus zombies » ne constituent aucune menace pour les humains. De nombreux scientifiques appellent aujourd'hui à accorder plus d'attention à la paléo-microbiologie et à mener des recherches dans ce domaine afin de mieux comprendre, prévoir et planifier la résurgence d'infections anciennes.



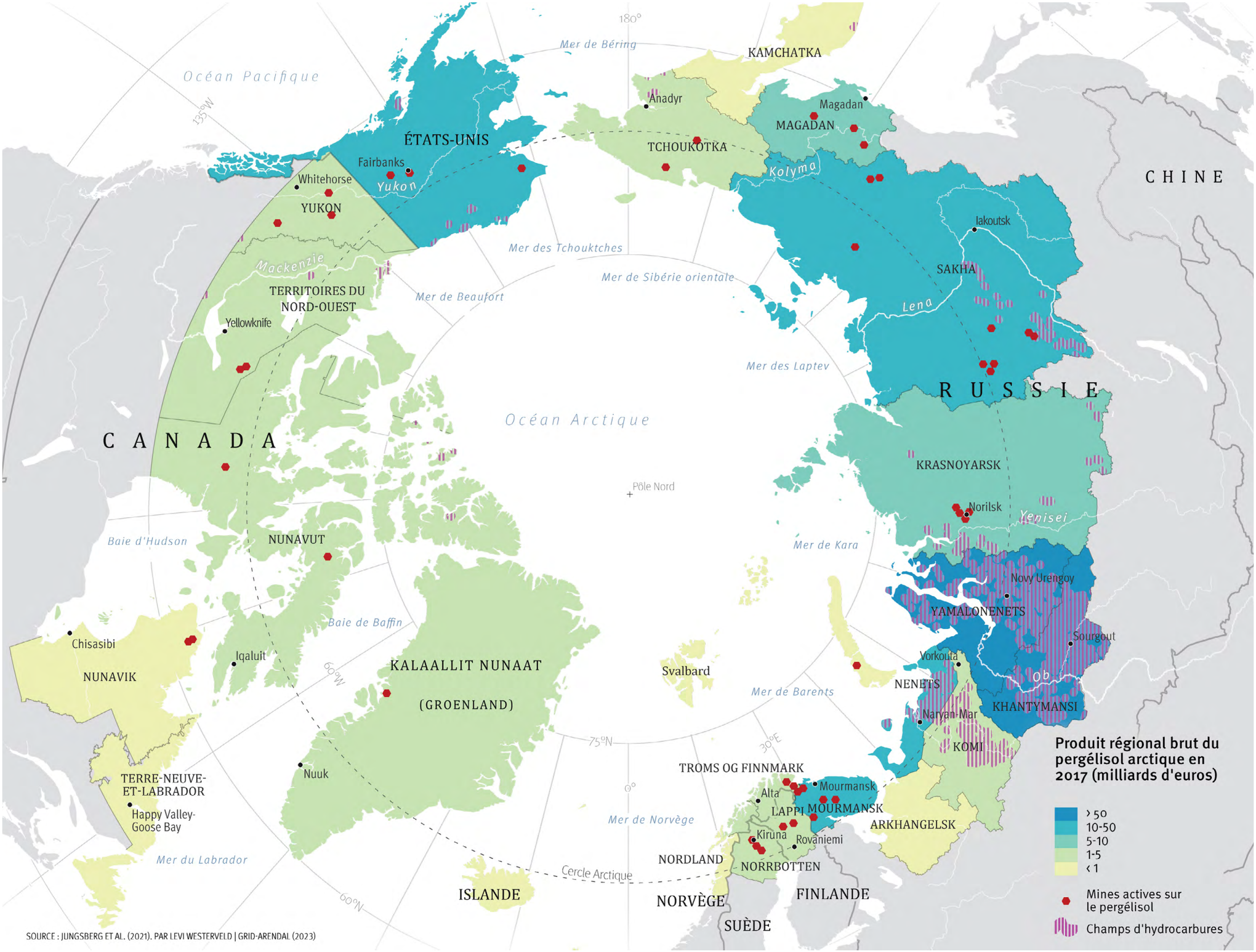
Distribution approximative de *Rangifer spp.*

SOURCE : CAFF (2001). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



Les données relatives à l'aptitude à la maladie du charbon ont été générées par les scientifiques à partir de sept caractéristiques environnementales susceptibles de contribuer à la prolifération et à la transmission de la maladie du charbon. Il s'agit de l'anomalie de température du sol, de l'évapotranspiration, du pH et du carbone organique du sol, des densités de rennes et d'autres hôtes, et des variations de la profondeur de la couche active.

SOURCE : STELLA ET AL. (2021). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



SOURCE : JUNGSBERG ET AL. (2021). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Actifs gelés I
L'économie formelle

Les régions arctiques ont en commun une combinaison d'économies formelles et de subsistance. L'économie formelle comprend l'extraction de ressources à grande échelle, telles que le pétrole et le gaz, le bois, la pêche et l'exploitation minière, qui servent toutes les marchés nationaux et internationaux. Les économies locales, quant à elles, fournissent des biens et des services à la population locale, y compris des emplois dans le secteur public. Les activités traditionnelles de subsistance, qui comprennent la chasse, la pêche, l'élevage et la cueillette, peuvent également constituer une part importante des économies locales.

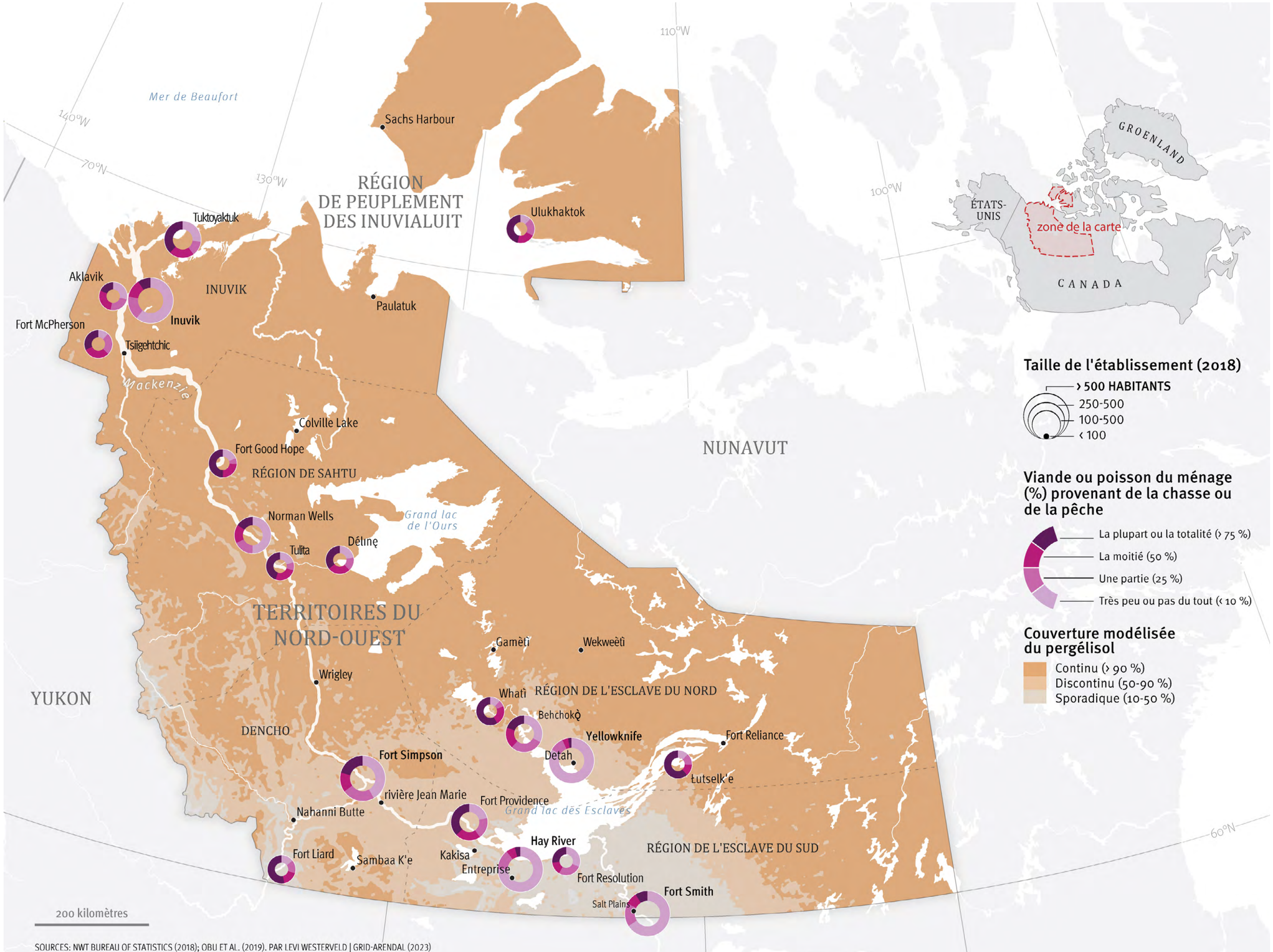
Le calcul du risque économique potentiel et du coût du dégel du pergélisol peut se faire de plusieurs manières. Les indicateurs économiques standard comme le PRB* peuvent être combinés avec l'étendue et les types de pergélisol pour comprendre quelle activité économique est potentiellement menacée par le dégel du pergélisol. L'ensemble de la région arctique de pergélisol est en fait l'une des régions économiques les plus productives de la planète. Avec un PRB de 458 milliards de dollars américains (2017), cela équivaut à un PRB par habitant de plus de 71 000 dollars américains, un chiffre supérieur à celui de l'Allemagne et des États-Unis et juste en dessous du PRB par habitant de la Suisse. Cependant, les bénéfices financiers de la production ne sont pas nécessairement réinvestis dans la région, mais sont souvent transférés à l'extérieur, de sorte que ces chiffres élevés peuvent cacher une partie de la pauvreté observée parmi les communautés locales.

*Le produit régional brut est une mesure de la valeur totale des biens et services produits dans une région. Lorsque le PRB est divisé par la population totale, on obtient une valeur par habitant qui indique le revenu moyen par habitant.

Le PRB par habitant peut également indiquer la disponibilité des ressources économiques pour s'adapter aux effets néfastes du changement climatique. Les régions de pergélisol dont le PRB par habitant est faible disposent de ressources limitées pour s'adapter et sont donc considérées comme plus vulnérables. Le type de pergélisol est également un facteur contributif : les activités économiques situées dans des zones de pergélisol discontinu et continu subiront des changements plus importants que celles situées dans des zones sporadiques et isolées, de sorte que des régions telles que la République de Sakha et Yamalo-Nénètsie sont considérées comme les plus vulnérables. Le PRB par habitant a également été combiné à d'autres indicateurs sociaux et physiques pour créer l'indice de vulnérabilité de la population du pergélisol arctique.

Le dégel du pergélisol a déjà entraîné des conséquences et des coûts considérables pour tous les secteurs de la société. Il se peut qu'il faille reloger les populations, construire de nouveaux logements, réparer les bâtiments existants pour éviter qu'ils ne s'effondrent, et réparer les routes, les chemins de fer, les aéroports et les oléoducs. Bien que le calcul du coût économique de la fonte du pergélisol dans l'Arctique soit un domaine de recherche émergent, plusieurs estimations sont disponibles, dont beaucoup se concentrent sur le coût de l'entretien, du remplacement ou de l'amélioration des infrastructures existantes. En général, ces estimations explorent plusieurs scénarios, y compris un scénario de réduction ou d'augmentation des émissions, en fonction de l'intensité en carbone de l'orientation future de notre société mondiale. Dans certains cas on peut évaluer l'opportunité de mesures d'adaptation susceptibles de réduire les dommages futurs et donc les coûts. Ce type d'estimations permet de faire comprendre qu'il est urgent de réduire les émissions, tout en soulignant la nécessité d'adopter des choix d'adaptation plus judicieux à court terme afin de réduire les coûts à long terme. Par exemple, le coût de l'entretien des infrastructures publiques de l'Alaska dans un scénario de statu quo est estimé à 5,5 milliards de dollars américains d'ici à 2099 (dans un scénario à fortes émissions) ou à 4,5 milliards de dollars américains (dans un scénario à faibles émissions). En revanche, l'adoption de mesures proactives, principalement liées aux mesures de lutte contre les inondations sur les routes de l'Alaska, devrait permettre de réduire ces coûts à 2,9 milliards de dollars américains et 2,3 milliards de dollars américains pour les scénarios à fortes et faibles émissions, respectivement.

En outre, le relâchement de carbone et de méthane dans l'atmosphère peut se chiffrer en termes de coûts économiques pour la société mondiale. Les coûts mondiaux associés à la poursuite du dégel du pergélisol par la libération de carbone et de méthane devraient dépasser de loin tous les avantages, tels que l'extension de l'agriculture vers le nord, ce qui souligne la nécessité d'une action urgente pour stabiliser les émissions. En 2015, des chercheurs ont estimé que la poursuite du dégel du pergélisol pourrait coûter 43 000 milliards de dollars américains à l'économie mondiale d'ici à 2100, ce qui équivaut à peu près à la moitié de la production économique mondiale annuelle d'aujourd'hui. Même si le monde parvient à stabiliser les températures bien en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels, le dégel du pergélisol, par la libération de gaz à effet de serre, devrait coûter à l'économie mondiale près de 25 000 milliards de dollars américains, soit environ 4 % du coût total du changement climatique pour l'économie mondiale.



SOURCES: NWT BUREAU OF STATISTICS (2018); OBU ET AL. (2019). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Actifs gelés II

Activités traditionnelles et de subsistance

Les activités traditionnelles et de subsistance ne sont généralement pas prises en compte dans les statistiques économiques officielles de l'Arctique (à l'exception de l'Alaska), ce qui rend ces activités largement invisibles dans les mesures de revenu ou de richesse, y compris le PRB. Cependant, de nombreuses études portant sur des communautés individuelles soulignent l'importance cruciale des activités de subsistance, notamment en ce qui concerne les aliments issus de la pêche, de la chasse et de la recherche de nourriture, également connus sous le nom « d'aliments traditionnels »» Il est essentiel de comprendre comment le dégel du pergélisol peut avoir un impact sur le type et l'abondance de la nourriture traditionnelle, ainsi que sur l'accès à celle-ci.

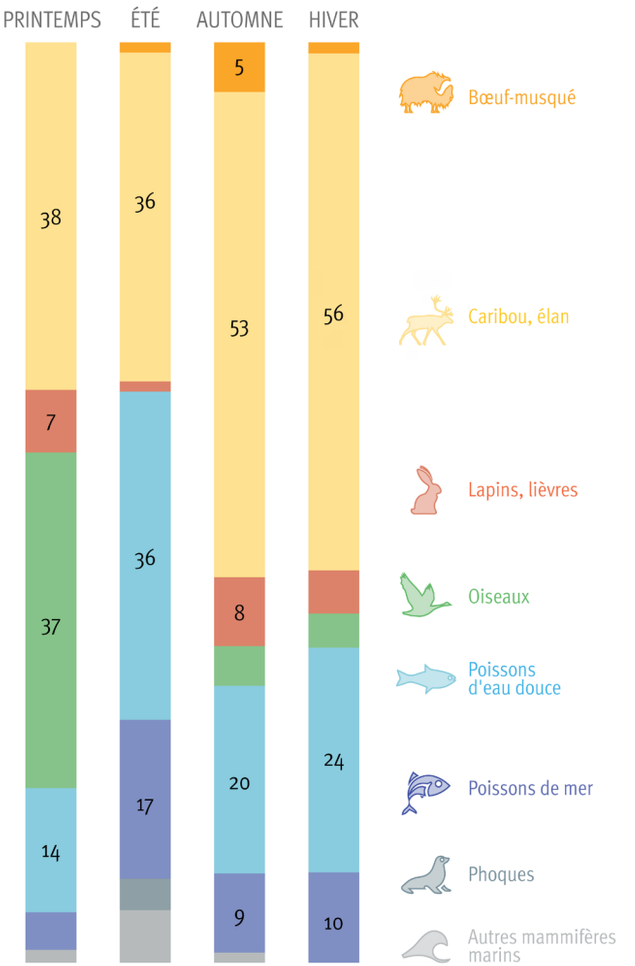
Des techniques de fixation des prix du marché* ont été utilisées pour attribuer une valeur monétaire aux activités de subsistance qui se déroulent dans les paysages de pergélisol de trois communautés côtières : Aklavik (Canada), Qeqertarsuaq (Kalaallit Nunaat/Groenland) et Longyearbyen (Svalbard, Norvège). Chaque communauté diffère par les types d'activités de subsistance déployées par ses habitants, y compris la proportion d'aliments traditionnels dans leur régime alimentaire.

Près de 50 % des aliments consommés à Aklavik et 60 % à Qeqertarsuaq proviennent de la chasse, de la cueillette, du piégeage et de la chasse à la baleine, alors qu'à Longyearbyen, ce pourcentage n'est que de 10 %. Si les paysages de pergélisol et les aliments qu'ils fournissent venaient à disparaître, les habitants d'Aklavik et de Qeqertarsuaq devraient débourser respectivement 240 et 460 euros pour acheter ces aliments, ce qui représente 17 % et 43 % de leurs revenus mensuels par habitant. Bien que ces chiffres soient théoriques, ils soulignent l'importance économique réelle des activités de subsistance et une crise potentielle du coût de la vie, si les aliments traditionnels n'étaient plus disponibles à l'avenir. Les denrées alimentaires achetées en magasin sont très chères, compte tenu des prix élevés des produits de base, dans l'ensemble de l'Arctique. Des coûts aussi élevés auraient un impact considérable sur le pouvoir d'achat et réduiraient le bien-être et la capacité des habitants à satisfaire leurs besoins fondamentaux.

La façon dont les écosystèmes arctiques et les communautés végétales et animales réagiront au dégel du pergélisol est un domaine de recherche émergent, et l'on ignore pour l'essentiel dans quelle mesure ces changements affecteront les activités de subsistance. Les changements de température, d'humidité et de nutriments du sol sont susceptibles de modifier la composition des plantes. Là où la teneur en glace de sol est élevée, l'affaissement du paysage peut entraîner la formation d'étangs et de lacs, transformant un habitat terrestre en un habitat aquatique. Les changements dans la végétation et le paysage peuvent entraîner une modification des voies de migration des animaux ou des changements dans la composition des espèces animales, et influencer l'accès de l'homme aux aliments traditionnels. Par exemple, la chasse peut prendre plus de temps si les chasseurs doivent contourner des effondrements dus au dégel ou si les élans se cachent mieux derrière des saules plus hauts. À mesure que le climat se réchauffe, certaines espèces arctiques pourront être remplacées par d'autres mieux adaptées aux nouvelles conditions. Sur terre, l'évolution des conditions du sol pourrait entraîner une modification des itinéraires de chasse ou une réduction de l'accès en motoneige. C'est au cours de cette « phase de transition » lorsque les sociétés humaines s'adaptent aux changements, que les coûts pourront être les plus élevés.

*Les techniques de fixation des prix du marché utilisent les prix d'un marché de substitution pour évaluer la valeur monétaire de biens et de services non marchands. Par exemple, pour évaluer la valeur des aliments traditionnels, on utilise le prix équivalent à ce qu'il en coûterait pour obtenir ce type d'aliments sur un marché conventionnel (boutiques, magasins ou supermarchés).

Proportion (%) des espèces les plus consommées à Aklavik, CA



SOURCE : RAMAGE ET AL. (2022). PAR GRID-ARENDAL (2023)

Patrie culturelle

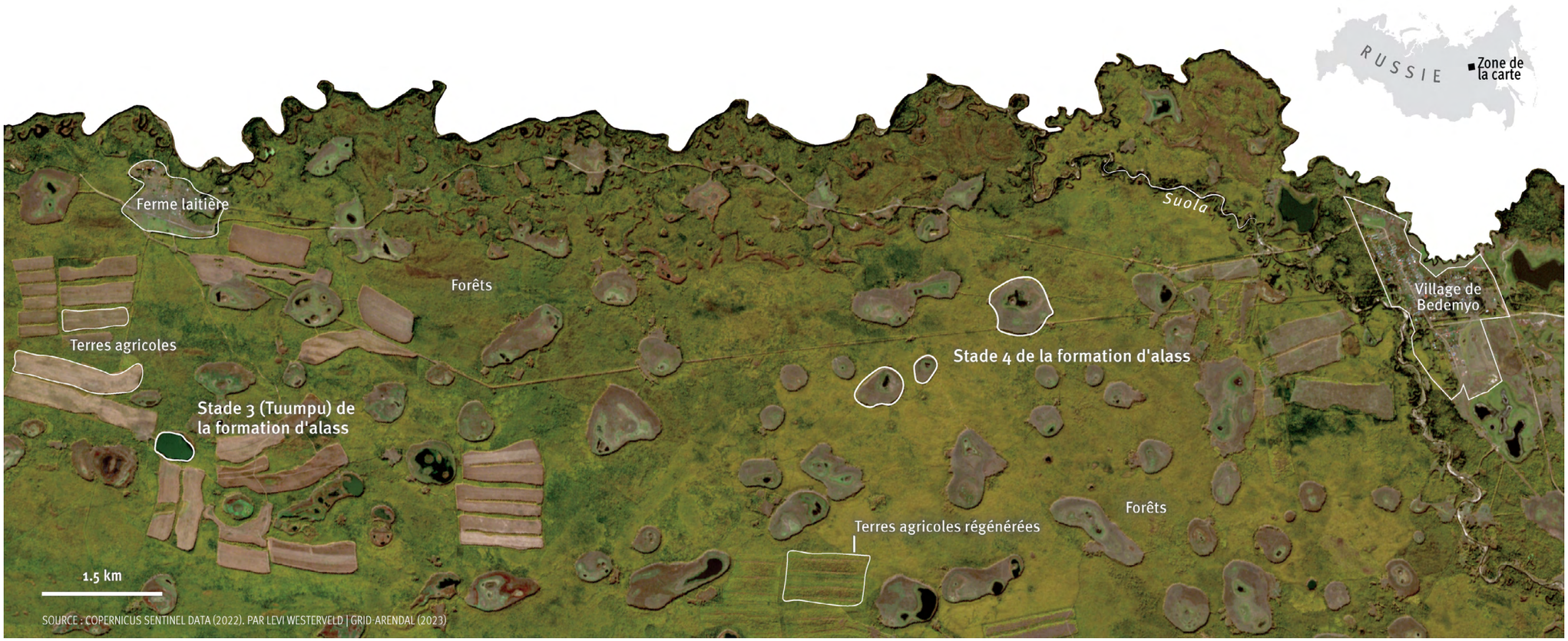
Paysages d'Alass en Iakoutie

Située dans l'Extrême-Orient russe, la République de Sakha (Iakoutie) est une région de pergélisol unique. Les basses terres de la Iakoutie centrale, qui s'étendent le long du bassin moyen de la Lena, sont caractérisées par un pergélisol riche en glace pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres de profondeur. Les paysages de pergélisol de type alass, qui consistent en des dépressions thermokarstiques ou des lacs de dégel drainés avec de vastes zones de surface affaissée, sont une caractéristique essentielle de cette région. Il existe plus de 16 000 alass en Iakoutie centrale, couvrant une superficie de 4 400 km².

En langue sakha « alass » signifie « un champ ou une prairie, entouré de forêts ; une vallée de piémont ». Les Sakha dépendent de l'alass et le considèrent comme leur patrie, imprégnée de qualités spirituelles conformément à leurs croyances animistes. Plus tard, lorsque l'aménagement du territoire a exigé l'étude scientifique de l'alass (alas en anglais et en russe) pour construire et exploiter les ressources, la définition est devenue très technique : il s'agit d'une forme de relief caractérisée par de vastes zones d'affaissement de la surface du sol résultant de la fonte du pergélisol riche en glace.

La formation des alass peut prendre des dizaines, voire des centaines d'années. Le processus commence par la déforestation naturelle de la zone, suivie d'un affaissement plus profond et de la dégradation des coins de glace. Lorsque les coins de glace fondent, la dépression se remplit d'eau de fonte et devient un lac. Au stade final, le paysage s'assèche et des prairies se forment au milieu et sur les bords extérieurs de la dépression.

les prairies alass attirent et soutiennent l'élevage depuis au moins 500 ans, formant la base des communautés et de la culture prospères du peuple Sakha. Entre le douzième et le quinzième siècle, les ancêtres turcs de la région ont migré vers le nord depuis la région du lac Baïkal et se sont installés autour des alass dans les bassins des rivières Lena et Viliouï. Grâce à des pratiques héritées de leurs ancêtres méridionaux, les Sakha ont réussi à manipuler les paysages des alass afin de

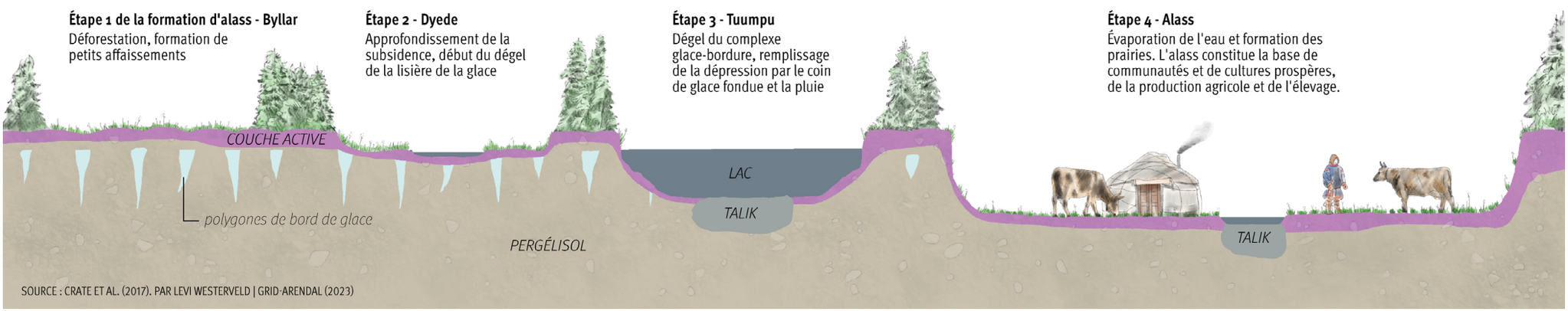


maximiser la production de foin pour leur bétail et leurs chevaux. Ils ont drainé les champs gorgés d'eau lors des années humides et créé un système de canaux et de barrages pour retenir l'eau en période de sécheresse. Ils ont également créé davantage de pâturages et de prairies de fauche en asséchant les lacs et en éliminant les forêts par le feu. Les alass sont considérés comme des êtres sensibles selon les croyances historiques des Sakha. Des aliments sacrifiés, des rituels et des bénédictions sont offerts aux alass. Les clans étendus, constitués de groupes de cinq à quinze ménages vivaient sur les alass, migrant entre les camps d'été et d'hiver.

À partir du XVIIe siècle, coïncidant avec l'introduction du système d'imposition foncière en Russie, le bétail a pris le pas sur les chevaux, et les alass étaient principalement gérés pour produire du foin, qui servait de fourrage au bétail. La période soviétique, qui a débuté dans les années 1920, a entraîné la collectivisation des exploitations agricoles et la formation de villages compacts. Les alass ont commencé à être utilisés pour la production de cultures à grande échelle, de pâturages ou de fourrage. À partir des années 1960, le bétail originaire de Sakha a été remplacé par des races européennes. Incapables de résister aux hivers rigoureux, les races européennes devaient rester à l'intérieur pendant neuf mois de l'année et être nourries de fourrage. Il en a résulté une intensification de la culture du foin et un drainage massif des alass pour créer davantage de prairies. L'effondrement de l'Union soviétique a entraîné d'autres changements : les fermes d'État ont été démantelées et l'élevage à grande échelle n'était plus rentable. La plupart des ménages se sont toutefois adaptés en détenant quelques bovins pour assurer leur subsistance. De nombreuses prairies, qui avaient été converties en terres cultivées pendant la période soviétique, ont été reconverties en prairies de fauche naturelles.

Comme d'autres éléments du paysage, les alass ne sont pas à l'abri des changements en cours dans le pergélisol. De nombreux lacs thermokarstiques augmentent en taille et en volume, principalement en raison de l'augmentation des précipitations estivales, d'une couverture neigeuse supérieure à la moyenne et de l'augmentation des eaux de fonte de la glace du pergélisol. Les alass ont également connu des changements dans leurs régimes d'inondation. Habituellement, les inondations n'ont lieu qu'au printemps, en raison de la fonte de la glace et de la neige, mais les inondations estivales sont devenues plus fréquentes. Alors que les inondations de printemps apportent des nutriments et sont considérées comme bénéfiques, les inondations d'été rendent la production de foin impossible. L'engorgement des alass ne limite pas seulement la production de foin, mais aussi l'accès aux forêts et aux autres ressources. Pour certains ménages, il est nécessaire de déménager en raison des conditions de plus en plus humides.

L'utilisation actuelle des alass est dictée non seulement par les conditions environnementales, mais aussi par les tendances sociales et démographiques et les modes de consommation. En raison d'une combinaison de facteurs tels que le manque de fourrage provenant de la terre, l'exode des jeunes vers Iakoutsk et la pénurie de main-d'œuvre, certains habitants ont abandonné l'élevage de bovins. Beaucoup optent désormais pour l'élevage de chevaux, qui implique généralement moins de travail. Les chevaux jouissent également d'un plus grand prestige dans la culture Sakha post-soviétique.



SOURCE : CRATE ET AL. (2017). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



© Katie Orlinsky

Tenir bon

Adaptation au dégel du pergélisol

Une route semée d'embûches

Infrastructures de transport et pergélisol

Un large éventail de technologies de transport est utilisé pour acheminer les personnes et les marchandises vers, depuis et autour de l'Arctique. Cela va des passerelles en bois surélevées sur un sol boueux aux utilidors* surélevés au-dessus du sol gelé, des autoroutes ouvertes toute l'année aux routes de glace saisonnières, et des ports maritimes aux aéroports qui constituent pour certaines communautés leur seul lien avec le reste du monde. Dans une certaine mesure, la dégradation du pergélisol affectera la plupart de ces technologies de transport, si ce n'est toutes.

Les variations thermiques du sol et le dégel autour des infrastructures de transport sont dus à deux facteurs principaux : l'augmentation des températures causée par le changement climatique et les impacts directs de l'infrastructure elle-même (par exemple, le réchauffement localisé du sol et la perturbation de la végétation isolante). Combinés, ces effets doublent la pression exercée sur le pergélisol, mettant à l'épreuve les infrastructures de transport ainsi que les vies et les moyens de subsistance dans l'Arctique.

*Un utilidor est un couloir ou tunnel technique utilisé pour transporter l'électricité, l'eau et les eaux usées. Dans les régions de pergélisol, les utilidors isolés thermiquement sont installés au-dessus du sol afin de prévenir le dégel du pergélisol et de réduire le risque de dommages aux infrastructures.

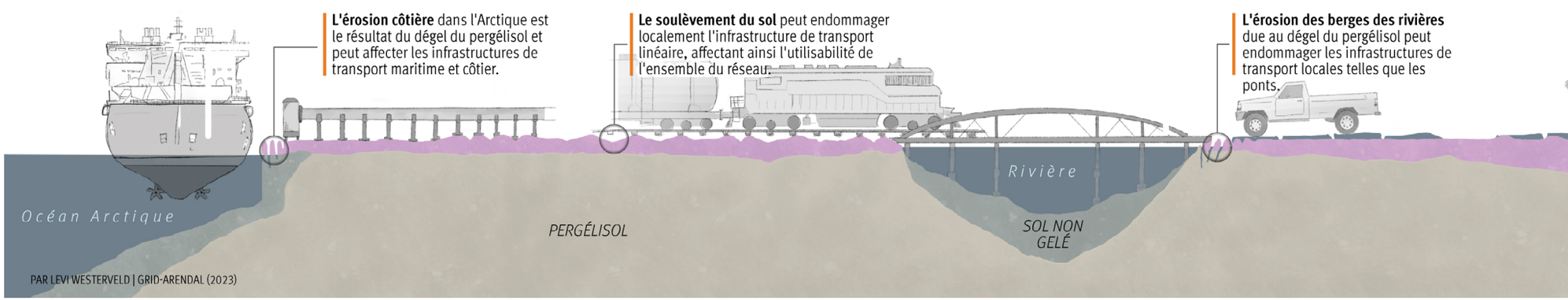
Les changements dans les terrains adjacents au pergélisol constituent également une menace en de nombreux endroits, en particulier les caractéristiques thermokarstiques. Lorsque le pergélisol dégèle, la glace du sol fond, laissant derrière elle des dépressions dans le paysage. Celles-ci se remplissent d'eau de fonte pour former des étangs ou des lacs thermokarstiques plus importants. Ces dépressions s'agrandissent en été lorsque les températures de l'air sont plus élevées, ce qui fragmente le paysage. L'expansion des caractéristiques thermokarstiques menace les fondations des infrastructures de transport car elle affaiblit la résistance des sédiments et, dans certains cas, conduit même à un effondrement total.

Les infrastructures aussi bien ponctuelles (par exemple, les ports et les aéroports) que linéaires (par exemple, les routes et les pipelines) sont vulnérables au dégel du pergélisol. Le développement des infrastructures dans les zones côtières a connu une croissance rapide au cours des dernières décennies, et une grande partie est construite sur des sols qui seront affectés par le dégel du pergélisol. Ces infrastructures sont souvent utilisées pour le transport et l'exportation de ressources naturelles. Les dommages causés par une réduction de la capacité portante du sol à mesure que le pergélisol se détériore constituent un risque pour le développement économique actuel et futur. Dans les aéroports, les distorsions créées par le dégel du pergélisol ont un impact négatif sur l'intégrité des pistes, ce qui pose des problèmes de sécurité et risque de paralyser ce type de transport.

Les infrastructures linéaires sont vulnérables au dégel du pergélisol, car les changements dans le sol hétérogène provoquent des tassements différentiels et déforment la structure. Un seul point faible le long d'une infrastructure linéaire peut rendre l'ensemble du réseau inutilisable (par exemple, une rupture dans un pipeline). La longueur de l'infrastructure et les points faibles le long de son tracé sont donc des facteurs importants à prendre en compte lors de l'évaluation de la vulnérabilité globale.

Le transport dans l'Arctique est multimodal, ce qui signifie que différentes technologies de transport sont reliées entre elles dans un réseau pour déplacer les personnes et les marchandises d'un endroit à l'autre. Pour qu'un réseau multimodal fonctionne, il faut que tous les composants de l'infrastructure soient intègres. Une piste ou une route défectueuse peuvent avoir des répercussions négatives sur l'ensemble du réseau. Près de 30 % des routes situées dans les régions pergélisolées de l'Arctique sont considérées comme présentant un risque d'affaissement

Multimodal transportation infrastructure and impacts of permafrost degradation



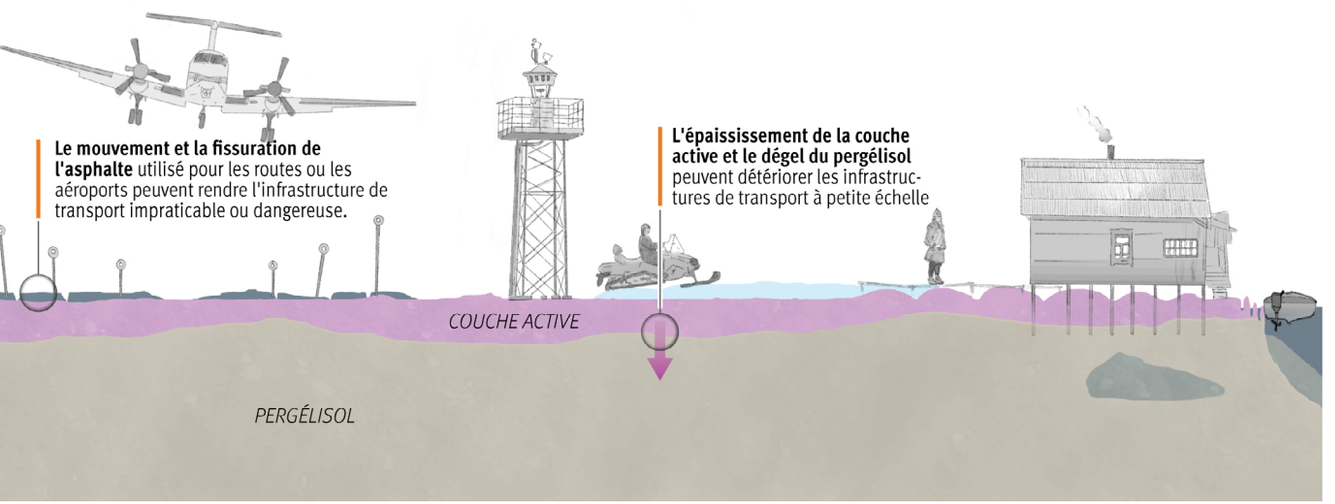
du sol dans le cadre de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre modérés, ce chiffre passant à 44 % dans le cadre de scénarios d'émissions élevées. Parmi ces routes, c'est en Russie que l'on trouve le plus grand nombre de routes à risque, dont les coûts moyens de remplacement sont estimés entre 50 et 70 millions de dollars américains environ, selon le scénario.

Depuis les années 1960, des efforts plus importants ont été déployés pour comprendre les impacts physiques du changement climatique sur les infrastructures de transport et pour adapter la construction et l'entretien à ces changements. L'amélioration de l'évaluation des risques des projets d'infrastructure existants et prévus peut aider à mieux gérer les impacts de la fonte du pergélisol. Par exemple, l'intégration de détails de haute précision provenant de modèles géotechniques dans des modèles de surface terrestre à grande échelle et à long terme peut permettre de mieux anticiper les impacts combinés du réchauffement climatique, du développement des infrastructures et de la dégradation du pergélisol afin de s'adapter à des changements à la fois lents et rapides.

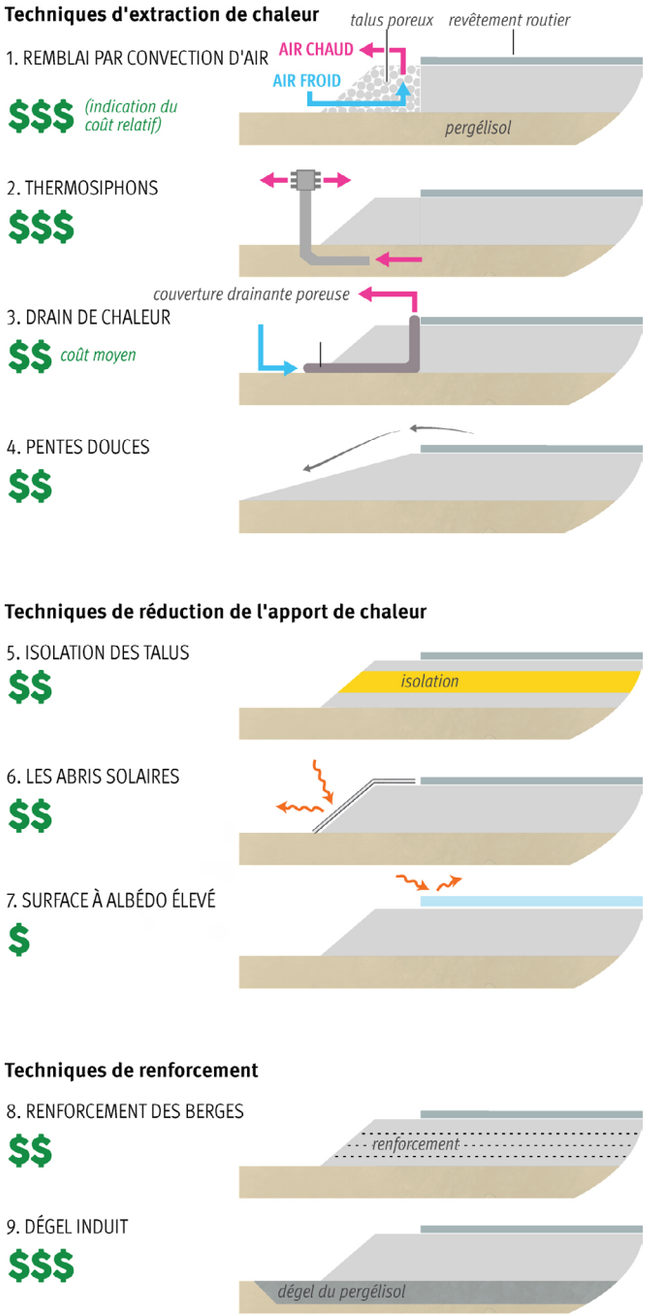
Outre une meilleure planification, il existe trois grandes approches pour protéger les infrastructures des effets du dégel du pergélisol : l'extraction de chaleur, la réduction de l'apport de chaleur et le renforcement. Les méthodes d'extraction de chaleur imitent les conditions hivernales pour refroidir les talus. L'objectif est d'éliminer la chaleur accumulée dans le talus et de réduire ainsi l'impact de l'infrastructure sur la structure thermique du sol. Les techniques comprennent les talus à convection d'air qui réduisent le réchauffement estival et améliorent le refroidissement hivernal, les conduites d'air qui tirent parti des conditions de vent locales, les drains thermiques, les thermosiphons et les talus inclinés qui limitent l'accumulation de neige.

Le soleil est une source majeure de chaleur pendant l'été arctique. Les méthodes visant à réduire ou à prévenir l'apport de chaleur consistent à limiter la quantité d'énergie transférée au pergélisol. Cela peut se faire par l'isolation, la construction sur pilotis, l'utilisation de matériaux ayant un albédo (pouvoir réfléchissant) plus élevé, ou l'utilisation de brise-soleil pour détourner la lumière du soleil des infrastructures vulnérables.

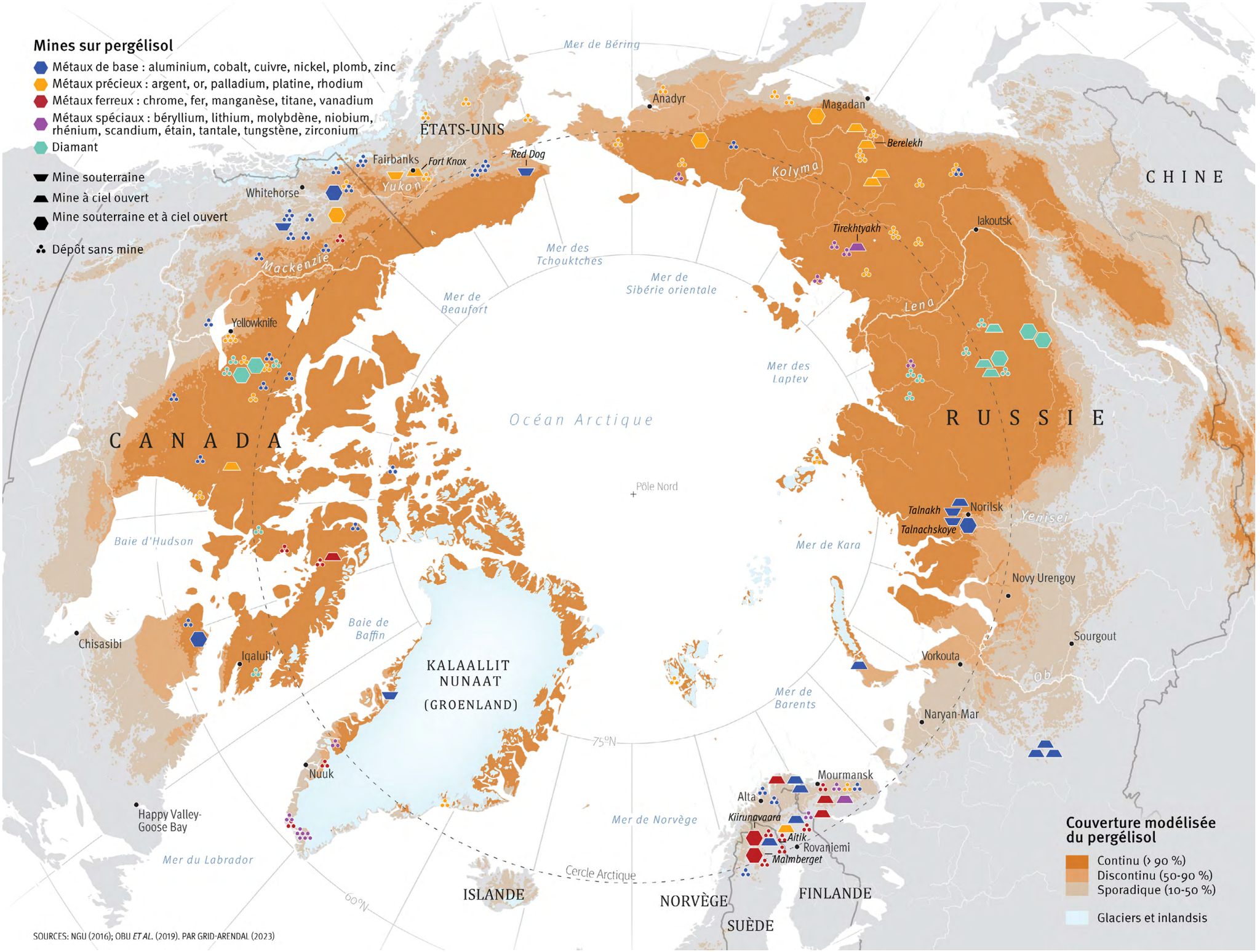
Les méthodes de renforcement utilisées pour limiter la dégradation du pergélisol autour des infrastructures comprennent le renforcement des remblais et l'utilisation d'un dégel contrôlé avant la construction des remblais. Des tronçons de la route de l'Alaska, par exemple, utilisent des remblais en coussins, tandis que pour la route Inuvik-Tuktoyaktuk dans les Territoires du Nord-Ouest, le Canada teste l'utilisation de géotextiles tissés pour atténuer les mouvements de pente.



Méthodes d'atténuation pour les infrastructures de transport



SOURCE : HJORT ET AL. (2022). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



SOURCES: NGU (2016); OBU *ET AL.* (2019). PAR GRID-ARENDAL (2023)

En terrain miné

Infrastructures minières et pergélisol

Si toutes les nations arctiques ont des activités minières, seuls le Canada, le Kalaallit Nunaat (Groenland), la Russie et l'État de l'Alaska ont des activités dans les environnements de pergélisol. En Alaska, l'or et le zinc sont les principaux minéraux extraits (à l'exception du pétrole et du gaz), et l'industrie contribue de manière significative à l'économie de la région. L'extraction de diamants joue également un rôle important dans l'économie du nord du Canada, en particulier dans les Territoires du Nord-Ouest. À Kalaallit Nunaat, l'exploitation minière ne représentait que 0,4 % du produit régional brut (PRB) en 2018, mais ce secteur est susceptible d'augmenter au cours des prochaines décennies, car le Kalaallit Nunaat abrite certains des plus grands gisements de minéraux au monde, y compris des minéraux de terres rares. Une grande partie de l'extraction minérale mondiale a lieu sur les vastes territoires de la Russie, notamment les minerais de fer et de ferro-alliages, les minerais non ferreux, les minerais de métaux précieux et les minerais industriels. Avec l'extraction du pétrole, ces secteurs représentent 60 % du PRB de l'Arctique russe.

De nombreuses mines de l'Arctique se trouvent dans des zones touchées par le dégel du pergélisol, et les changements de paysage qui s'ensuivent créent des défis et des risques pour ces opérations. Les infrastructures minières peuvent avoir un impact sur l'échange d'énergie entre la surface et l'atmosphère, connu sous le nom d'équilibre énergétique de surface, ce qui peut provoquer un dégel local. L'accélération du dégel du pergélisol causée par le réchauffement climatique pourrait toutefois modifier le paysage de manière encore plus radicale. Le dégel du pergélisol ne rendra pas impossible l'exploitation minière dans l'Arctique, mais il aura des conséquences en termes de sécurité des opérations, notamment en ce qui concerne les impacts sur les systèmes d'eau douce et le stockage sécurisé des résidus miniers.

Les résidus sont un sous-produit de l'exploitation minière, comprenant un mélange de solides et de fluides utilisés dans le processus d'extraction. Dans l'Arctique, le pergélisol a constitué une barrière efficace contre les dépôts de résidus, empêchant les contaminants de s'infiltrer dans l'environnement. Cependant, à mesure que le pergélisol dégèle et que la glace souterraine qu'il contient fond, la conductivité hydraulique augmente. Cela signifie que l'eau, ainsi que les éléments dissous, peuvent se déplacer plus facilement et potentiellement s'infiltrer dans les eaux souterraines ou les masses d'eau locales. Par conséquent, le recours au pergélisol pour le confinement des résidus n'est plus une option viable et d'autres solutions sont nécessaires.

L'un des moyens d'assurer le confinement des résidus consiste à renforcer la résistance physique des dépôts au moyen de couvertures de gravier épaisses ou d'un empilement à sec. Cette dernière approche vise à réduire les niveaux d'humidité dans les résidus afin de diminuer le risque d'infiltration et de minimiser le risque de défaillance catastrophique. Une autre option pour sécuriser les résidus consiste à utiliser des thermosiphons, un dispositif conçu pour refroidir le sol en extrayant la chaleur du sol afin d'empêcher le dégel en dessous et autour des barrages de résidus.

Les projets miniers devraient s'appuyer sur les connaissances collectives en partageant les expériences dans l'Arctique afin de contribuer aux meilleures pratiques pour une exploitation sûre et saine dans la région. Par exemple, le Conseil international des mines et métaux, une organisation composée de sociétés minières opérant dans le monde entier, a reconnu que le pergélisol était un facteur de risque potentiel dans les années à venir, en particulier pour les mines qui ont une longue durée de vie. La conception des mines doit être holistique afin de relever les différents défis liés à l'exploitation minière dans l'Arctique. Ces défis comprennent l'éloignement, la limitation des infrastructures, les conditions climatiques difficiles, la disponibilité de l'eau, le changement climatique et la stabilité à long terme des résidus. La planification d'un avenir où les conditions du pergélisol changent sera fondamentale pour garantir une conception holistique. De telles conceptions devraient toujours inclure la modélisation de scénarios, par exemple en étudiant comment le sol et l'hydrologie changeront à mesure que le sol se réchauffe.

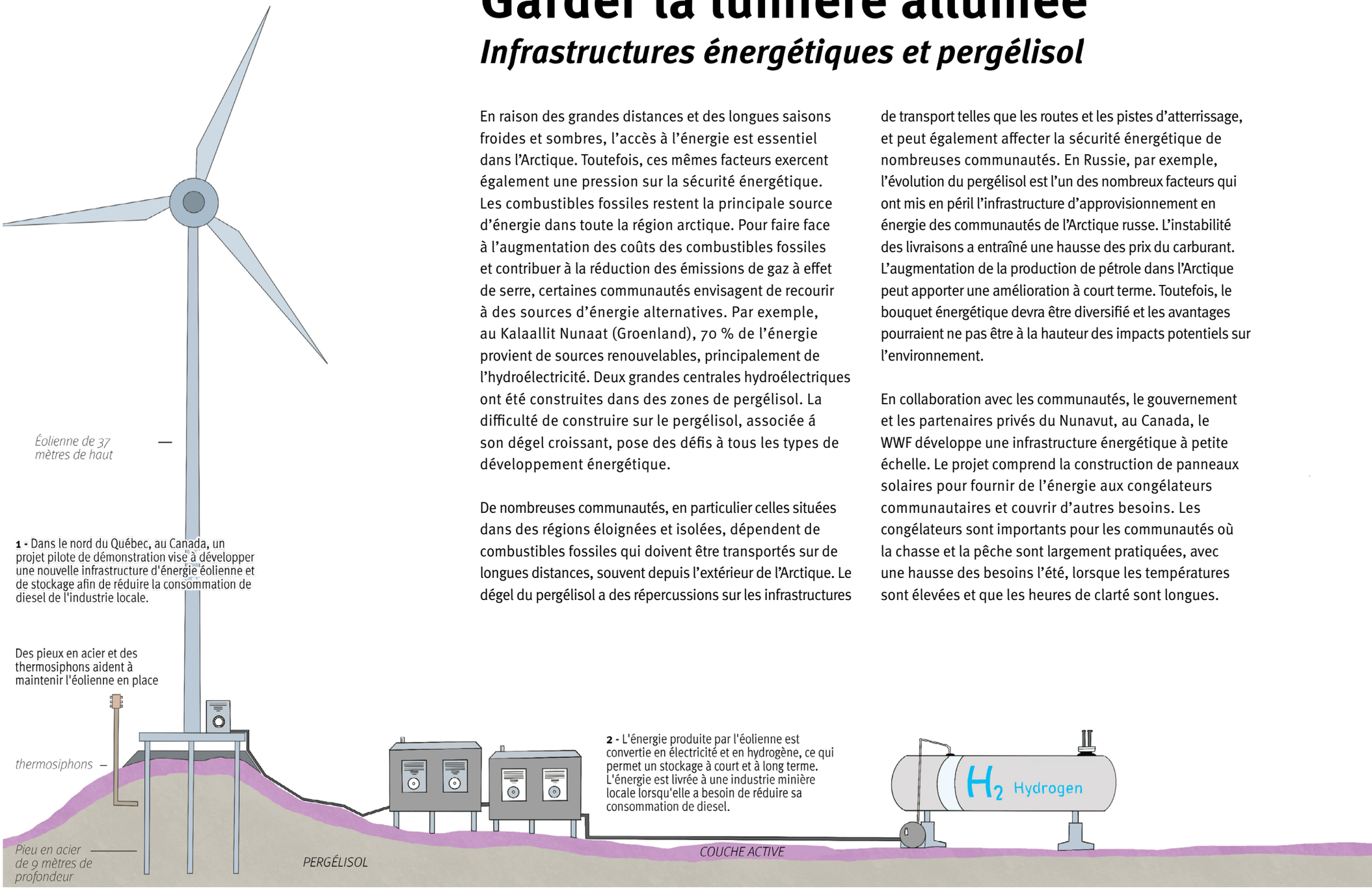
Garder la lumière allumée

Infrastructures énergétiques et pergélisol

En raison des grandes distances et des longues saisons froides et sombres, l'accès à l'énergie est essentiel dans l'Arctique. Toutefois, ces mêmes facteurs exercent également une pression sur la sécurité énergétique. Les combustibles fossiles restent la principale source d'énergie dans toute la région arctique. Pour faire face à l'augmentation des coûts des combustibles fossiles et contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, certaines communautés envisagent de recourir à des sources d'énergie alternatives. Par exemple, au Kalaallit Nunaat (Groenland), 70 % de l'énergie provient de sources renouvelables, principalement de l'hydroélectricité. Deux grandes centrales hydroélectriques ont été construites dans des zones de pergélisol. La difficulté de construire sur le pergélisol, associée á son dégel croissant, pose des défis à tous les types de développement énergétique.

De nombreuses communautés, en particulier celles situées dans des régions éloignées et isolées, dépendent de combustibles fossiles qui doivent être transportés sur de longues distances, souvent depuis l'extérieur de l'Arctique. Le dégel du pergélisol a des répercussions sur les infrastructures de transport telles que les routes et les pistes d'atterrissage, et peut également affecter la sécurité énergétique de nombreuses communautés. En Russie, par exemple, l'évolution du pergélisol est l'un des nombreux facteurs qui ont mis en péril l'infrastructure d'approvisionnement en énergie des communautés de l'Arctique russe. L'instabilité des livraisons a entraîné une hausse des prix du carburant. L'augmentation de la production de pétrole dans l'Arctique peut apporter une amélioration à court terme. Toutefois, le bouquet énergétique devra être diversifié et les avantages pourraient ne pas être à la hauteur des impacts potentiels sur l'environnement.

En collaboration avec les communautés, le gouvernement et les partenaires privés du Nunavut, au Canada, le WWF développe une infrastructure énergétique à petite échelle. Le projet comprend la construction de panneaux solaires pour fournir de l'énergie aux congélateurs communautaires et couvrir d'autres besoins. Les congélateurs sont importants pour les communautés où la chasse et la pêche sont largement pratiquées, avec une hausse des besoins l'été, lorsque les températures sont élevées et que les heures de clarté sont longues.



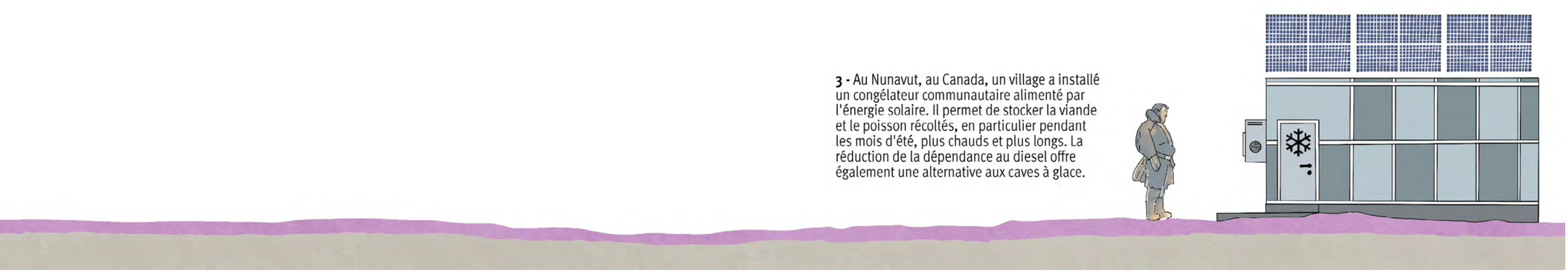
Les caves de glace dans le pergélisol ont longtemps été utilisées pour stocker des aliments, mais le réchauffement du pergélisol signifie que les températures dans les caves de glace sont trop élevées pour stocker les aliments en toute sécurité et, dans certains cas, les caves dégèlent. Les congélateurs fonctionnant à l'énergie produite par des panneaux solaires peuvent constituer une alternative durable pour ces communautés.

Les parcs éoliens situés dans les régions de pergélisol sont confrontés à des défis uniques. La construction d'éoliennes nécessite des équipements lourds qui peuvent endommager le pergélisol sous-jacent. Les éoliennes ont également besoin de fondations solides et stables pour palier aux contraintes exercées sur les structures lorsqu'elles sont en fonctionnement. Des problèmes peuvent apparaître lorsque le dégel du pergélisol affaiblit l'intégrité du sol.

De nombreuses techniques ont été mises au point pour adapter les éoliennes aux paysages de pergélisol. Dans le sud-ouest de l'Alaska, des piliers hélicoïdaux ont été creusés à 11-12 mètres sous la surface pour ancrer les fondations en acier et en béton dans les couches plus profondes du sol. Au Nunavik, au Canada, une éolienne pilote construite en 2014 a utilisé une fondation sur pieux qui s'étend sous la couche active dans « une fondation en acier en forme d'araignée ». En plus de stabiliser les fondations en cas de dégel du pergélisol, le projet a également permis de réduire de 90 % la quantité de béton nécessaire pour les fondations, ce qui met en évidence les avantages de cette méthode pour les régions arctiques reculées. Parmi les autres méthodes d'adaptation utilisées ou testées, citons le recours à des fondations plus lourdes pour garantir la stabilité, de contrôleurs qui adaptent le fonctionnement des turbines à l'évolution des conditions du sol et de mécanismes visant à réduire les vibrations structurelles.

De nombreux paysages de pergélisol se prêtent à la production d'énergie hydroélectrique et l'évolution des conditions climatiques peut rendre de nouvelles zones attrayantes pour le développement. L'hydroélectricité a déjà été largement développée dans les paysages alpins de haute altitude pour exploiter l'énergie de l'eau qui s'écoule sur des pentes abruptes. En outre, comme on prévoit une augmentation des précipitations dans l'Arctique, davantage d'énergie hydroélectrique peut être exploitée dans le nord. La planification de l'évolution du climat avec des conditions hydrologiques et terrestres modifiées et la prise en compte des impacts de l'agrandissement des réservoirs d'eau sur le dégel du pergélisol devraient être au cœur du développement futur de l'énergie hydroélectrique dans l'Arctique et dans les régions de haute montagne.

Lorsque le pergélisol dégèle, l'eau peut percoler à travers le sol précédemment gelé et pénétrer dans les couches souterraines. En fonction de facteurs tels que le caractère continu ou discontinu du pergélisol, ce processus peut modifier l'écoulement et avoir un impact sur la disponibilité de l'eau pour les centrales hydroélectriques. Pour planifier les changements futurs, il est nécessaire de modéliser à la fois le climat et les structures hydrologiques locales. Le développement de ces modèles implique également le partage et la communication des résultats aux parties prenantes impliquées dans le développement de l'énergie hydroélectrique, ainsi que la réalisation d'études d'impact environnemental appropriées.



3 - Au Nunavut, au Canada, un village a installé un congélateur communautaire alimenté par l'énergie solaire. Il permet de stocker la viande et le poisson récoltés, en particulier pendant les mois d'été, plus chauds et plus longs. La réduction de la dépendance au diesel offre également une alternative aux caves à glace.

Pas de temps à perdre

Gestion des déchets et pergélisol

Contrairement à l'image de l'Arctique en tant que paysage vierge, la région connaît des problèmes de gestion des déchets. Les villes arctiques, par exemple, produisent plus de déchets par habitant, recyclent moins et ont des taux de collecte des déchets inférieurs à la moyenne mondiale. Les déchets peuvent également constituer un problème pour de nombreuses communautés autochtones dont le mode de vie traditionnel produit peu de déchets inorganiques mais qui, plus récemment, ont adopté un mode de vie plus urbain. L'élimination correcte des déchets est importante non seulement pour les localités de stockage elles-mêmes, mais aussi pour la santé de l'environnement au sens large. Le dégel du pergélisol affecte les installations de stockage dans de nombreux endroits, ce qui en fait un problème urgent nécessitant des recherches plus approfondies.

Il existe des différences significatives dans les types de déchets produits entre les grands centres urbains de l'Arctique et les petites communautés isolées. Une grande ville, comme Anchorage, avec une population importante et une économie diversifiée, produit une plus grande variété de déchets, y compris des déchets dangereux, par rapport à une petite localité, comme Unalaska, où la pêche au crabe royal est l'activité économique la plus importante. Une étude menée par le groupe de travail sur le développement durable (SDWG) du Conseil de l'Arctique a identifié plusieurs facteurs ayant une incidence sur la bonne gestion des déchets. Il s'agit notamment de l'accessibilité, de la taille de la population et de l'accès au soutien et au financement du gouvernement. La connectivité avec les installations régionales de traitement des déchets desservant une population plus importante, par exemple, permet d'accéder à l'équipement et à la maintenance, ce qui n'est pas le cas des petites communautés qui ne disposent pas d'un accès routier. La présence d'une communauté engagée avec des champions locaux est également importante pour développer des systèmes de gestion des déchets appropriés, tout comme le soutien des gouvernements régionaux et nationaux aux communautés locales dans cette tâche.

Les décharges situées sur le pergélisol doivent être traitées différemment de celles situées dans des climats plus chauds. Le pergélisol est sensible aux perturbations, et le fait de creuser des trous pour les décharges ou d'enlever la couverture isolante affectera sa stabilité. C'est pourquoi de nombreuses communautés arctiques préfèrent les décharges de type « á regel » en surface, car cette technique ne nécessite pas de creuser profondément dans le sol. Dans les décharges à retour de gel, les déchets supérieurs gèlent totalement ou partiellement en raison du climat froid et peuvent donc être confinés. Le pergélisol est également utilisé comme couche inférieure imperméable, empêchant les fuites dans le milieu environnant.

La conception des décharges de remblayage varie. Dans le code administratif de l'Alaska, par exemple, certaines décharges situées dans des régions de pergélisol peuvent être exemptées de certaines règles telles que la présence d'un revêtement (une barrière imperméable entre la décharge et les zones environnantes de manière à éviter les fuites) et la surveillance de l'impact sur les eaux souterraines. Cette exemption repose sur l'idée qu'un retour à la normale est envisageable dans les zones où le pergélisol est stable, car les déchets y resteront gelés pendant toute la durée de vie de la décharge, voire au-delà. Cependant, certaines décharges ne peuvent pas réaliser de retour à la normale et, dans ce cas, une barrière gelée pourrait être mise en place autour de la décharge.

Si le fait de s'appuyer sur le pergélisol comme couche imperméable peut être une conception fonctionnelle dans le climat actuel, l'augmentation des températures éliminera cette option dans de nombreux endroits de l'Arctique. Si la couche de pergélisol sous-jacente dégèle, des contaminants viendront s'infiltrer et polluer l'environnement, les rivières et les eaux souterraines. En outre, les déchets eux-mêmes peuvent provoquer un dégel local à l'intérieur et autour des décharges. L'ampleur réelle du réchauffement dépend du type de déchets stockés. Les décharges de fragments de charbon, par exemple, peuvent produire de la chaleur par oxydation, tandis que les sites de déchets solides municipaux produisent de la chaleur par décomposition. Lorsque le pergélisol autour d'une décharge dégèle, des zones non gelées du pergélisol, appelées zones de talik, se créent sous les déchets, et des fuites des décharges dans l'eau et le sol peuvent se produire. Si on laisse les taliks se développer, le sol peut finir par s'effondrer, formant des dépressions thermokarstiques. Bien qu'il existe certaines options d'adaptation (par exemple, le renforcement des digues des décharges, l'introduction de digues à convection d'air et de thermosiphons), de meilleures technologies sont nécessaires dans ce domaine.

Les décharges situées sur le pergélisol posent plusieurs problèmes potentiels. Il est donc important de veiller à ce qu'elles soient correctement construites et gérées afin de contenir les déchets en toute sécurité et de prévenir le dégel du pergélisol. Pour un meilleur rapport coût-efficacité, les gouvernements peuvent également pourvoir à l'aménagement du territoire et s'appuyer sur les cartes de risques comme outils pratiques pour localiser et cibler les zones les plus dangereuses nécessitant de nouvelles solutions d'ingénierie.

Les lois et les réglementations jouent un rôle important pour garantir une bonne gestion des déchets, mais tous les États arctiques n'ont pas encore examiné les conditions particulières des paysages de pergélisol. Par exemple, la stratégie russe concernant les déchets ménagers adoptée en 2013 ne mentionne pas spécifiquement les régions de pergélisol. L'élaboration de telles stratégies sera bénéfique à long terme, compte tenu de la pression exercée sur les paysages de pergélisol.

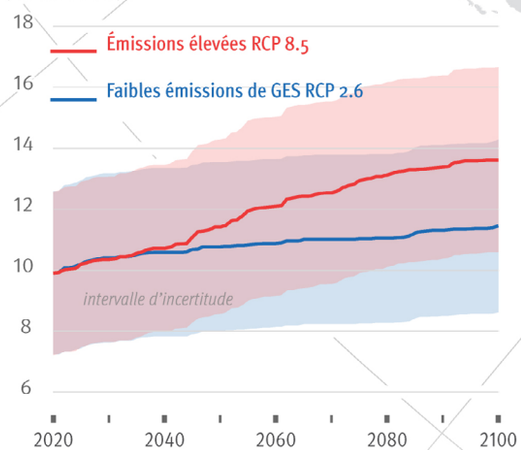
A **Point McIntyre** était une base militaire historique dont la décharge subissait la pression de l'érosion du littoral. Pour prévenir la pollution, un processus de déplacement de la décharge vers l'intérieur des terres a débuté en 2013. Une technique de freezeback a été appliquée à la décharge pour garantir le confinement des déchets.

B **Golovin** figure dans le rapport 2019 du Groupe pour le développement durable (SDWG) sur les meilleures pratiques de gestion des déchets dans les petites communautés arctiques éloignées. À Golovin, les cellules des tranchées sont creusées jusqu'au pergélisol, qui agit comme une couche imperméable. Le rapport du SDWG souligne que l'opérateur de la décharge est un champion local, que le travail de la communauté maintient une décharge propre et organisée, ainsi que son bon programme d'entretien

C **Arctic Village** a été l'un des sites pilotes du programme national Backhaul Alaska. Le backhauling consiste à évacuer les déchets d'une communauté vers un endroit où les systèmes de traitement des déchets sont plus adéquats. Bien que coûteux, c'est parfois la meilleure solution pour éviter la pollution.

Sites contaminés sur le pergélisol en cours de dégradation dans l'ensemble de l'Arctique

(EN MILLIERS)



Mer des Tchouktches

Océan Arctique

Mer de Beaufort

Mer de Béring

Golfe de l'Alaska

70°

180°

170°W

160°W

140°W

60°

Utqiagvik

Kotzebue

Prudhoe Bay

Nome

Golovin

Bethel

Fairbanks

Deltana

Dillingham

Whitehorse

ALASKA (ÉTATS-UNIS)

YUKON

Yukon

Couverture modélisée du pergélisol

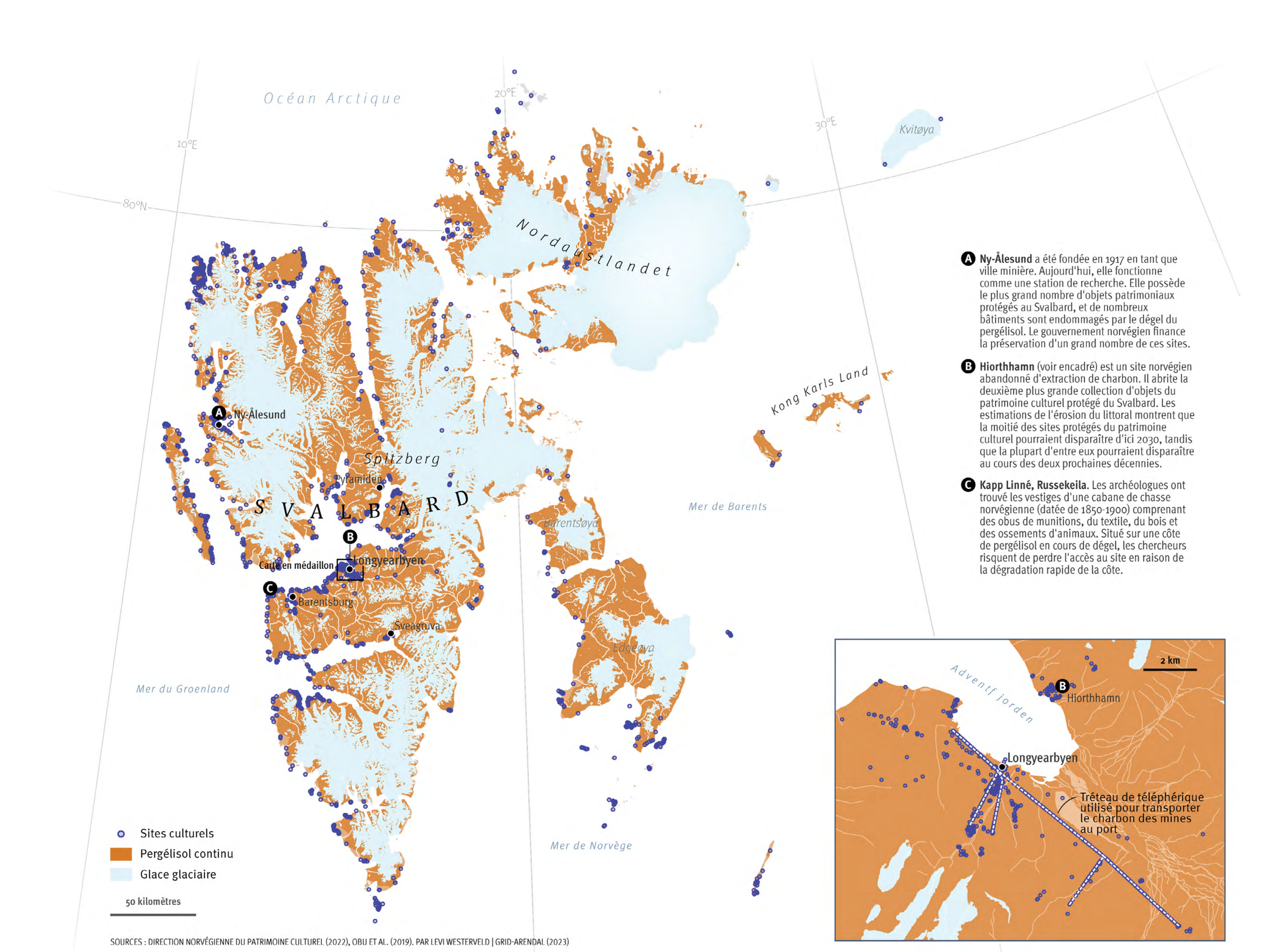
- Continu (› 90 %)
- Discontinu (50-90 %)
- Sporadique (10-50 %)
- Glaciers et inlandsis

État d'avancement de l'assainissement des sites contaminés sur le pergélisol

- Nettoyage terminé
- Non nettoyé

200 kilomètres

SOURCES: LANGER ET AL. (2023); OBU ET AL. (2019). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



A **Ny-Ålesund** a été fondée en 1917 en tant que ville minière. Aujourd'hui, elle fonctionne comme une station de recherche. Elle possède le plus grand nombre d'objets patrimoniaux protégés au Svalbard, et de nombreux bâtiments sont endommagés par le dégel du pergélisol. Le gouvernement norvégien finance la préservation d'un grand nombre de ces sites.

B **Hiorthhamn** (voir encadré) est un site norvégien abandonné d'extraction de charbon. Il abrite la deuxième plus grande collection d'objets du patrimoine culturel protégé du Svalbard. Les estimations de l'érosion du littoral montrent que la moitié des sites protégés du patrimoine culturel pourraient disparaître d'ici 2030, tandis que la plupart d'entre eux pourraient disparaître au cours des deux prochaines décennies.

C **Kapp Linné, Russekeila.** Les archéologues ont trouvé les vestiges d'une cabane de chasse norvégienne (datée de 1850-1900) comprenant des obus de munitions, du textile, du bois et des ossements d'animaux. Situé sur une côte de pergélisol en cours de dégel, les chercheurs risquent de perdre l'accès au site en raison de la dégradation rapide de la côte.

SOURCES : DIRECTION NORVÉGIENNE DU PATRIMOINE CULTUREL (2022), OBU ET AL. (2019). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Histoire moderne

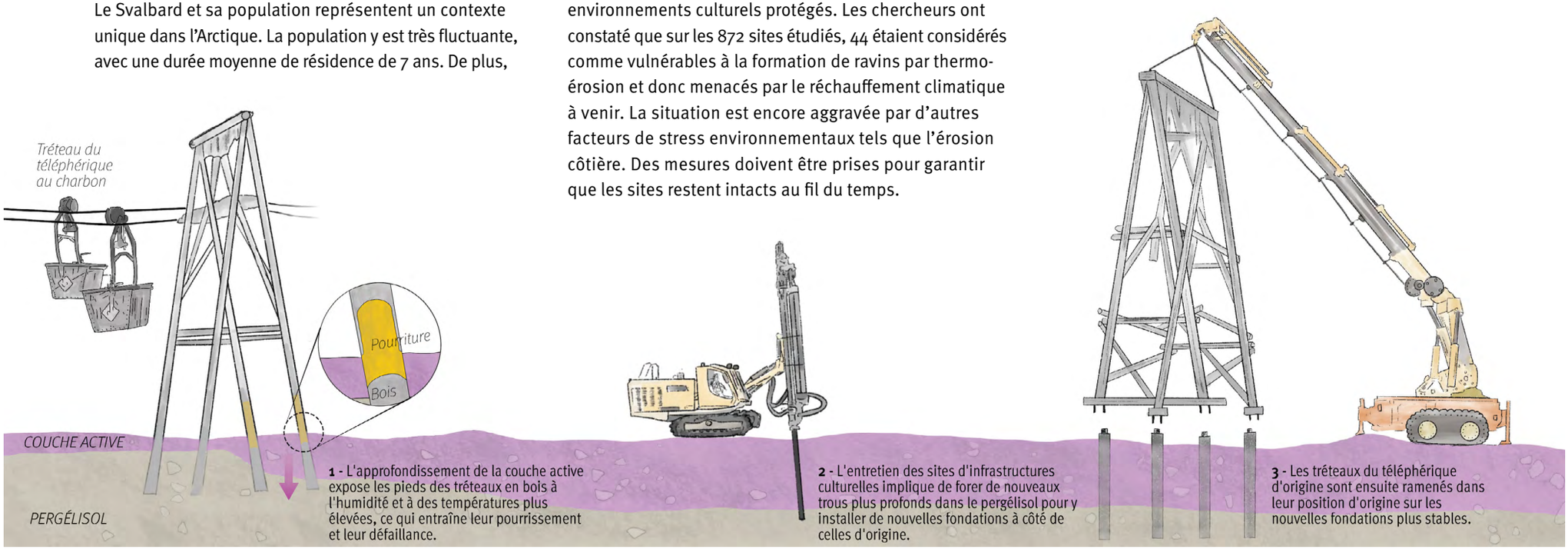
Préserver le patrimoine culturel du Svalbard

La région arctique a une histoire culturelle riche et variée qui a laissé derrière elle une myriade de sites du patrimoine culturel. La culture arctique est préservée par les populations qui continuent à pratiquer leurs moyens de subsistance traditionnels et autochtones. Ces moyens de subsistance et ce patrimoine culturel sont toutefois soumis à une pression croissante en raison des effets du changement climatique, entre autres menaces. Les fondations des bâtiments et infrastructures anciens sont de qualité variable et, avec le dégel du pergélisol, les sites du patrimoine culturel risquent d'être endommagés et de s'effondrer. Bien qu'il existe des solutions technologiques pour protéger les sites du patrimoine culturel (par exemple, le renforcement des fondations ou la construction de barrières de protection), il y a des limites. La principale d'entre elles est la question du coût, un problème exacerbé dans l'Arctique en raison du coût élevé du transport des outils, des matériaux et du personnel.

Le Svalbard et sa population représentent un contexte unique dans l'Arctique. La population y est très fluctuante, avec une durée moyenne de résidence de 7 ans. De plus, contrairement à de nombreuses autres communautés arctiques, l'île n'était pas habitée en permanence jusqu'à ce que les opérations minières commencent au début du XXe siècle. Il en résulte un sentiment d'appartenance différent de celui d'autres régions de l'Arctique où la culture peut être retracée à travers l'histoire ancestrale. Les sites du patrimoine culturel jouent donc un rôle important au Svalbard, car l'environnement bâti contribue à préserver une identité historique et culturelle particulière. Les sites patrimoniaux du Svalbard revêtent une importance internationale car ils représentent des histoires uniques d'établissements humains.

La loi sur l'environnement du Svalbard stipule que toutes les structures et tous les sites datant d'avant 1946 sont automatiquement protégés. L'île compte 8 300 sites du patrimoine culturel officiellement enregistrés, allant des bâtiments et des infrastructures aux tombes et aux environnements culturels protégés. Les chercheurs ont constaté que sur les 872 sites étudiés, 44 étaient considérés comme vulnérables à la formation de ravins par thermo-érosion et donc menacés par le réchauffement climatique à venir. La situation est encore aggravée par d'autres facteurs de stress environnementaux tels que l'érosion côtière. Des mesures doivent être prises pour garantir que les sites restent intacts au fil du temps.

Le projet « Climat polaire et patrimoine culturel » met en évidence trois valeurs qui s'affrontent dans le système actuel du patrimoine culturel au Svalbard. La valeur patrimoniale est liée à une attitude de conservation où l'authenticité et les intérêts de la recherche sont les plus importants. La valeur d'usage, plus pragmatique, met l'accent sur la valeur pratique des bâtiments et des biens. Enfin, la valeur expérientielle concerne l'expérience holistique que les visiteurs et les résidents ont lorsqu'ils interagissent avec les sites du patrimoine culturel. Ces systèmes de valeurs peuvent être complémentaires, même si des controverses surgissent parfois. Par exemple, si les acteurs ayant une valeur d'usage peuvent être intéressés par l'application de techniques de construction modernes et efficaces pour protéger et restaurer les sites patrimoniaux, cela pourrait diminuer leur valeur patrimoniale.



1 - L'approfondissement de la couche active expose les pieds des tréteaux en bois à l'humidité et à des températures plus élevées, ce qui entraîne leur pourrissement et leur défaillance.

2 - L'entretien des sites d'infrastructures culturelles implique de forer de nouveaux trous plus profonds dans le pergélisol pour y installer de nouvelles fondations à côté de celles d'origine.

3 - Les tréteaux du téléphérique d'origine sont ensuite ramenés dans leur position d'origine sur les nouvelles fondations plus stables.



© Olga Borjon-Privé (Oluko)

PORTRAIT CONSEILLÈRE À LA BASE NAVALE DE KINGS BAY NY-ÅLESUND, NORVÈGE

Ingrid Rekkavik

Si je me suis retrouvée à Ny-Ålesund, c'est en partie parce que j'ai toujours aimé l'aventure. Je me suis intéressée aux monuments culturels et à ce qu'ils peuvent nous apprendre, et j'ai décidé de devenir archéologue. Le patrimoine culturel est passionnant parce que les gens sont passionnants. Les monuments culturels nous apprennent comment les hommes, à différentes époques et dans différents lieux, ont utilisé leur intelligence, leurs compétences et leur créativité pour survivre et donner un sens à leur vie.

À 79 degrés nord, Ny-Ålesund est la communauté la plus septentrionale du monde et la dernière ville entreprise de Norvège, gérée par Kings Bay AS. Aujourd'hui, nous gérons une station de recherche et, en été, jusqu'à 150 personnes y vivent. Mais en hiver, nous n'avons qu'environ 35 employés permanents. Ny-Ålesund était à l'origine une communauté minière, fondée en 1916, mais la production de charbon s'est arrêtée dans les années 1960. Les bâtiments qui s'y trouvent nous ouvrent une fenêtre sur le passé et peuvent nous en apprendre beaucoup sur les espoirs, la créativité et la persévérance des personnes qui ont vécu ici avant nous. Les mineurs venaient ici à l'automne, sachant qu'ils seraient coincés dans l'obscurité totale et l'isolement pendant six mois. La façon dont ils ont réussi à vivre dans des conditions plutôt pitoyables, comparées aux normes actuelles, est une source d'inspiration.

J'ai rencontré le pergélisol pour la première fois lorsque j'ai commencé à travailler à Svea, une autre ancienne mine de charbon du Svalbard. J'ai rapidement appris qu'il n'était pas facile de creuser le sol. Nous devions attendre la bonne saison ou attendre pendant des semaines que le soleil réchauffe suffisamment le sol avant de pouvoir commencer à creuser décimètre par décimètre. Même les grosses excavatrices de 30 tonnes ne pouvaient pas passer. Pendant cette période, j'ai acquis une compréhension pratique de concepts tels que la couche active. Je connaissais déjà les sols gelés pour avoir fait de l'archéologie sur le continent norvégien, mais ici, le gel ne vient pas de l'air froid au-dessus du sol, mais plutôt en dessous.

Lors de mes premiers travaux à Svea, j'ai également beaucoup appris de collègues plus expérimentés, de mineurs et de personnes vivant au Svalbard depuis longtemps. Ils m'ont expliqué comment le pergélisol était plus stable et plus fiable à l'origine et comment les choses évoluaient. Tous les bâtiments de Ny-Ålesund sont construits sur le pergélisol, nous en sommes donc dépendants. Lorsque le pergélisol dégèle de plus en plus profondément chaque année, cela a un impact sur les bâtiments. Les poteaux sur lesquels reposent les bâtiments sont fixés par le gel, mais souvent de manière inégale, ce qui affecte encore plus la stabilité des bâtiments. Cela peut créer de nombreux problèmes, et les changements se sont accélérés. Et il n'y a pas que les maisons. Soudain, un tronçon de route disparaît. Tout est soudain un peu moins stable. Lorsque vous vivez à 1 000 kilomètres de l'agglomération la plus proche, vous devez réfléchir à ce que cela signifie pour la sécurité de la communauté et vous préparer aux situations d'urgence.

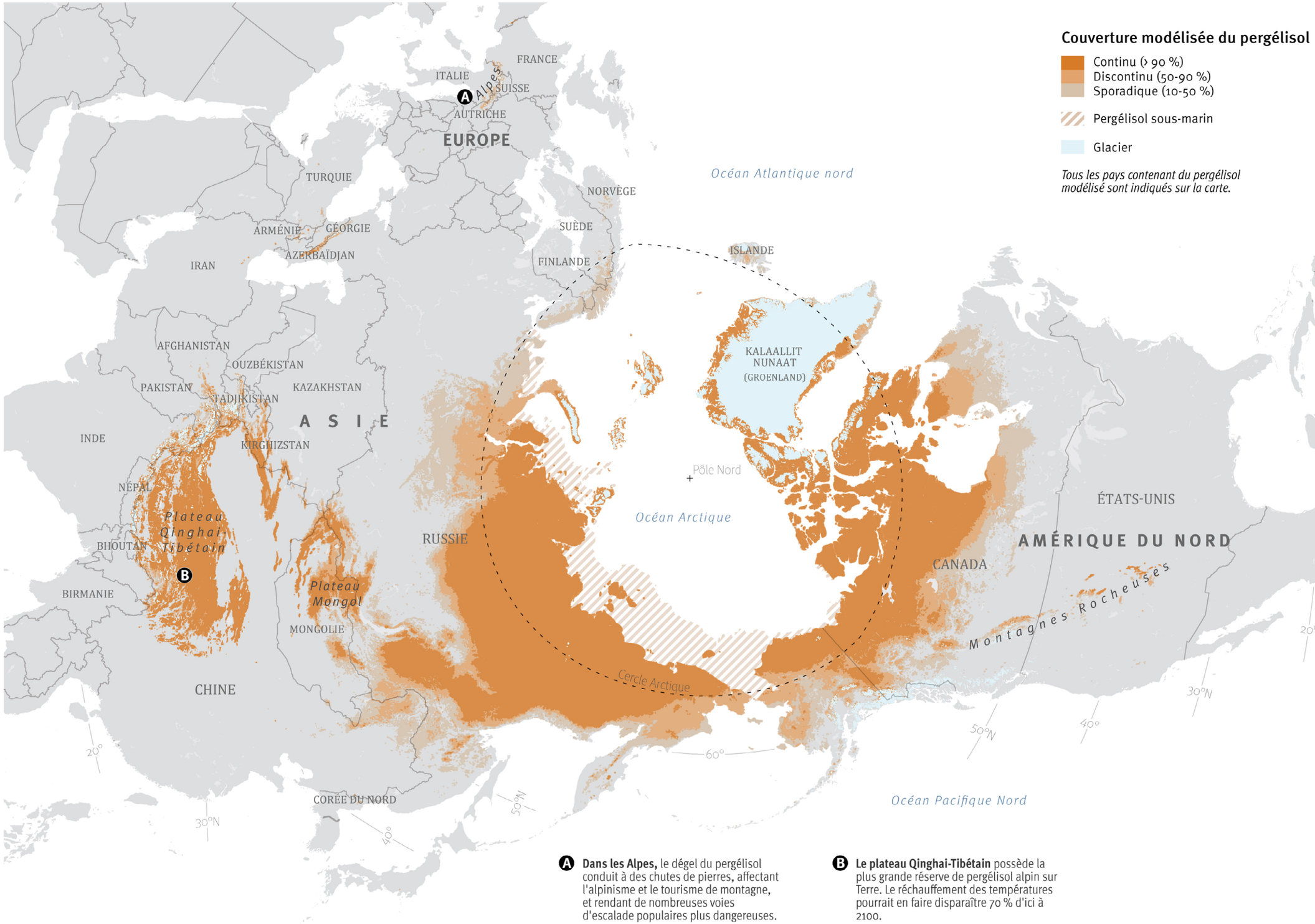
À Ny-Ålesund, nous avons la plus grande collection de bâtiments protégés du Svalbard. Nous avons 29 bâtiments sous le régime le plus strict de préservation, construits entre 1909 et 1945, parmi un total de 40 bâtiments considérés comme ayant une valeur culturelle. C'est une lourde responsabilité, car il s'agit d'un patrimoine culturel national datant de la période minière. Avant de réparer les fondations de vieux bâtiments, nous devons considérer l'importance de leur valeur historique par rapport à l'utilité et au coût économique de leur entretien. Nous devons peser les avantages et les inconvénients. Il devient de plus en plus coûteux de faire face à l'impact du changement climatique. Alors, combien de temps, d'argent et de matériel devrions-nous consacrer à la sauvegarde des monuments historiques ? À un moment donné, nous devons repenser nos priorités.



© Katie Orlinsky

Vers le sud

Le pergélisol dans d’autres régions



A **Dans les Alpes,** le dégel du pergélisol conduit à des chutes de pierres, affectant l'alpinisme et le tourisme de montagne, et rendant de nombreuses voies d'escalade populaires plus dangereuses.

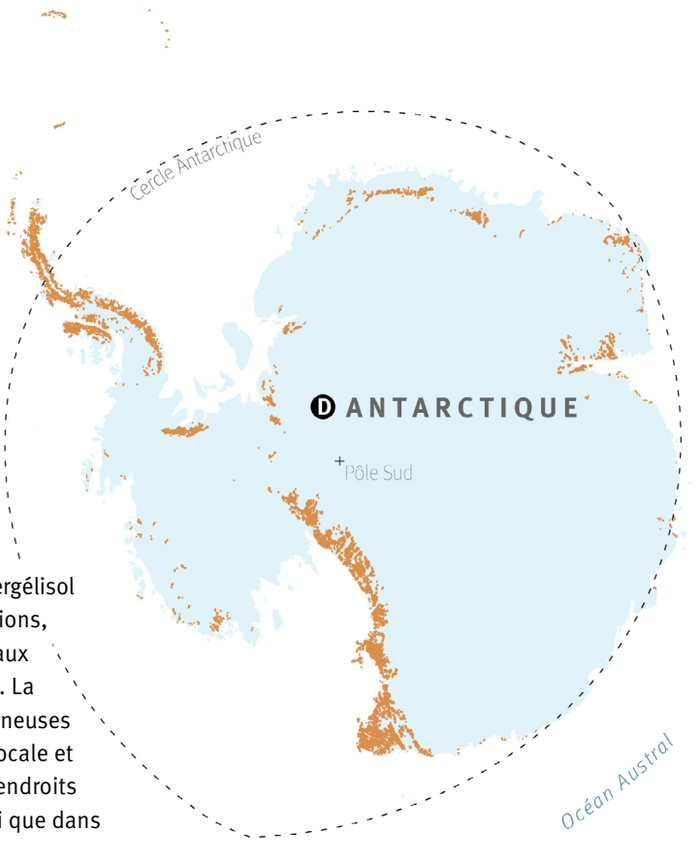
B **Le plateau Qinghai-Tibétain** possède la plus grande réserve de pergélisol alpin sur Terre. Le réchauffement des températures pourrait en faire disparaître 70 % d'ici à 2100.

SOURCES: OBU ET AL. (2019A), (2019B), (2020); OVERDUIN ET AL. (2019). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)



C Les glaciers rocheux **des Andes** reposent sur une couche de pergélisol riche en glace, considérée comme un contributeur saisonnier important au débit des cours d'eau et donc à la sécurité de l'eau

D Le pergélisol est présent dans la plupart des zones libres de glace de **l'Antarctique,** soit moins de 0,2 % du continent. Il pourrait exister sous l'énorme calotte glaciaire de l'Antarctique, mais il n'y a aucune preuve directe de son existence.



Une perspective planétaire

Le pergélisol en dehors de l'Arctique

Le pergélisol est également présent en dehors de l'Arctique, dans les zones libres de glace de l'Antarctique et à des altitudes élevées dans le monde entier, où la température reste inférieure à 0 °C pendant une grande partie de l'année. Le pergélisol est très répandu dans les zones montagneuses du plateau Qinghai-Tibétain, dans la région himalayenne de l'Hindu Kush, en Asie centrale et en Mongolie, ainsi que dans les Andes sud-américaines, les Alpes européennes, les montagnes Rocheuses d'Amérique du Nord et même à Hawaï (non indiqué sur la carte).

S'il existe des similitudes entre le pergélisol polaire et le pergélisol de montagne, il y a aussi des différences significatives. Par rapport à l'Arctique et à l'Antarctique, par exemple, les zones montagneuses avec pergélisol présentent une gamme extrême de précipitations, allant des conditions très sèches des Andes aux environnements très humides de la Norvège. La présence de pergélisol dans les zones montagneuses est fortement influencée par la topographie locale et est plus susceptible de se produire dans les endroits qui se trouvent généralement à l'ombre, ainsi que dans les vallées aux versants abrupts situées à des latitudes plus élevées. Ces facteurs entraînent un degré beaucoup plus élevé d'hétérogénéité spatiale (patchiness) dans les zones montagneuses avec pergélisol que dans les environnements polaires où le pergélisol est plus souvent spatialement continu sur de vastes étendues.

Géants de glace

Le pergélisol dans les montagnes

En dehors de l'Arctique, le pergélisol se trouve le plus souvent en haute montagne. Il est plus prononcé sur les pentes orientées vers le nord dans l'hémisphère nord et sur les pentes orientées vers le sud dans l'hémisphère sud. À mesure que l'altitude diminue, le pergélisol devient moins étendu et plus discontinu, isolé ou sporadique, jusqu'à ce qu'il disparaisse complètement. Outre la latitude et l'altitude, la présence de pergélisol est également déterminée par les précipitations, les températures extrêmes saisonnières et quotidiennes, l'humidité de l'air, l'humidité du sol et la géologie.

Les technologies de télédétection ne permettent pas d'effectuer des observations directes du pergélisol, de sorte que la cartographie du pergélisol dépend de mesures sporadiques de la température du sol, complétées par des extrapolations et des interprétations. Les données d'observation, à leur tour, sont inégalement réparties entre les différentes régions et à l'intérieur de celles-ci, et les stratégies d'échantillonnage varient localement. Par exemple, dans les Alpes européennes, le pergélisol est souvent observé à haute altitude ou au sommet des montagnes, alors que sur le plateau tibétain, l'échantillonnage est principalement effectué pour des applications pratiques, comme le long des routes pour surveiller le dégel.

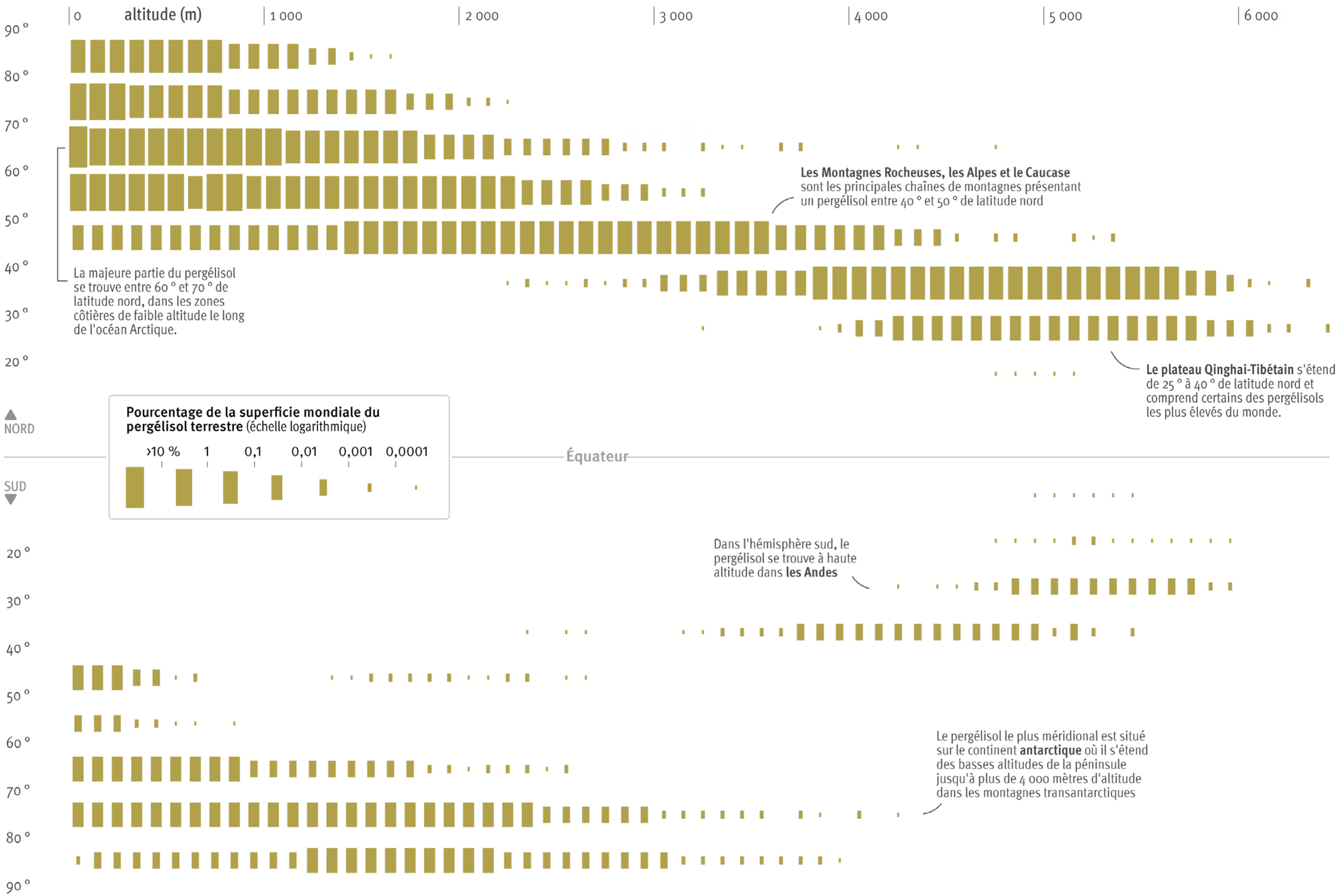
Ces différentes techniques d'observation peuvent fausser les analyses de la présence de pergélisol. Si l'on ajoute à cela les facteurs environnementaux mentionnés ci-dessus, il en résulte un degré élevé d'incertitude dans les modèles de présence de pergélisol dans les montagnes, ainsi que dans sa réaction au changement climatique mondial. Quoi qu'il en soit, il est prouvé que les températures plus élevées résultant du changement climatique mondial d'origine anthropique provoquent le dégel du pergélisol. Bien que les mesures soient rares et inégalement réparties entre les régions montagneuses, les données existantes indiquent un réchauffement de 0,14 à 0,24 °C par décennie en moyenne pour 28 sites montagneux en Asie, au Canada, dans les Alpes européennes et en Scandinavie.

Comme dans l'Arctique, les effets du dégel du pergélisol des montagnes peuvent être très dévastateurs. Ce dégel affecte la qualité de l'eau, augmente le risque de glissements de terrain et endommage les infrastructures. Le pergélisol agit comme une barrière pour l'eau, de sorte que la pluie et l'eau de fonte s'écoulent sur le pergélisol à la surface de la terre, alimentant les ruisseaux et les rivières. La fonte du pergélisol peut affecter l'écoulement des eaux de surface et souterraines lorsque la perméabilité du sol augmente et que la couche active s'approfondit. Les modifications des voies hydrologiques peuvent perturber l'agriculture locale et l'approvisionnement en eau potable. La qualité de l'eau est également affectée par la modification du débit des cours d'eau et par la libération de métaux lourds, de sédiments et de contaminants provenant du dégel du pergélisol.

L'amincissement et le dégel du pergélisol rendent les pentes des montagnes instables, ce qui augmente le risque de glissements de terrain et d'avalanches de pierres. ces phénomènes peuvent endommager les infrastructures et provoquer des pertes humaines, en particulier dans les zones densément peuplées ou à forte activité touristique. Le dégel du pergélisol dans les barrages des lacs de montagne peut engendrer des inondations par débordement et des inondations catastrophiques résultant de la libération soudaine d'un grand volume d'eau. Les routes, les voies ferrées et les bâtiments qui reposent sur le pergélisol sont également menacés, car le sol devient moins stable avec le dégel du pergélisol. En fait, la présence même de routes et de bâtiments peut accélérer le dégel du pergélisol en perturbant le sol et en le réchauffant localement.

Notre compréhension de la présence de pergélisol dans les zones montagneuses et des impacts que le changement climatique mondial d'origine anthropique aura sur les communautés situées dans les régions montagneuses à pergélisol est très lacunaire. Par ailleurs, le dégel du pergélisol a un impact sur les communautés de montagne. Ces impacts devraient devenir plus prononcés et plus fréquents avec l'augmentation prévue du réchauffement climatique.

Distribution du pergélisol en fonction de l'altitude et de la latitude



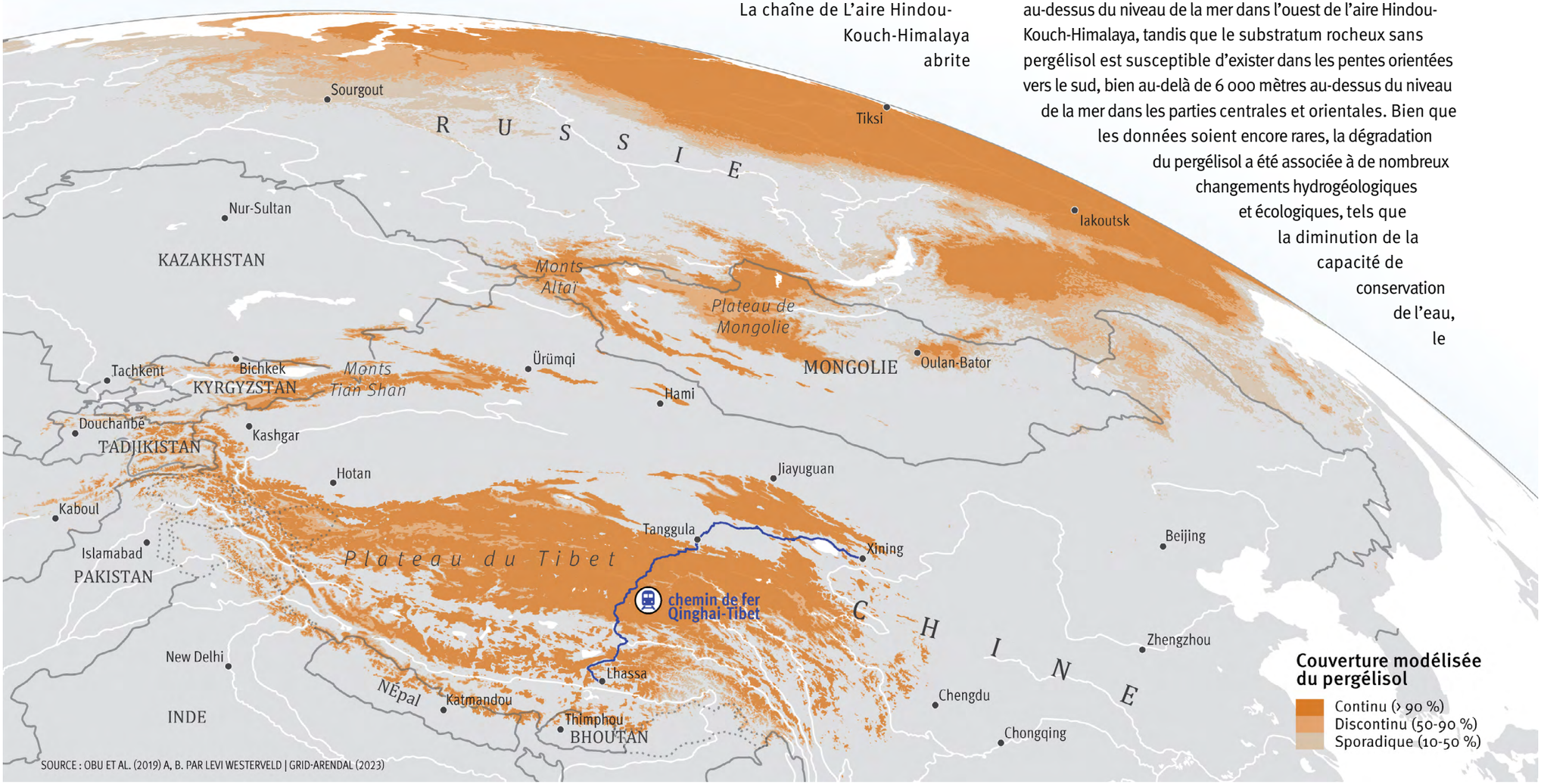
NOTE : le graphique inclut toutes les données modélisées sur le pergélisol sporadique, discontinu et continu d'Obu et al. (2019).
SOURCES: OBU ET AL. (2019A), (2019B), (2020); SRTM (2015). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

La vue du sommet

Le plateau Qinghai-Tibétain, l'Hindou-Kouch-Himalaya et les Andes

La plus grande zone de pergélisol en dehors de l'Arctique se trouve sur le plateau Qinghai-Tibétain, qui s'étend jusqu'aux pentes de l'Hindou-Kouch-Himalaya au sud. Environ 40 % du plateau est caractérisé par la présence de pergélisol, ce qui en fait la plus grande réserve de carbone de montagne ou de pergélisol de haute altitude de la planète. Le réchauffement atmosphérique affecte déjà le pergélisol du plateau Qinghai-Tibétain, et des modèles informatiques récents prédisent que le changement climatique pourrait le réduire de 70 % d'ici à 2100.

La chaîne de L'aire Hindou-Kouch-Himalaya abrite les plus hautes montagnes du monde, dont le mont Everest qui culmine à 8 849 mètres au-dessus du niveau de la mer. Les grandes variations topographiques combinées aux variations régionales de la température de l'air entraînent une grande variation de l'altitude à laquelle se produit le pergélisol. Le pergélisol peut se trouver jusqu'à 3 500 mètres au-dessus du niveau de la mer dans l'ouest de l'aire Hindou-Kouch-Himalaya, tandis que le substratum rocheux sans pergélisol est susceptible d'exister dans les pentes orientées vers le sud, bien au-delà de 6 000 mètres au-dessus du niveau de la mer dans les parties centrales et orientales. Bien que les données soient encore rares, la dégradation du pergélisol a été associée à de nombreux changements hydrogéologiques et écologiques, tels que la diminution de la capacité de conservation de l'eau, le



SOURCE : OBU ET AL. (2019) A, B. PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

rétrécissement des zones humides et des prairies, ainsi que la réduction de la productivité, de la diversité et de la couverture végétale des prairies.

Dans toute la région, des milliers de kilomètres de routes et de voies ferrées ont été construits dans des zones de pergélisol et sont maintenant exposés à des dommages potentiels dus au dégel du pergélisol. Outre le réchauffement climatique, les activités d'ingénierie elles-mêmes peuvent créer des changements thermiques qui conduisent à la dégradation du pergélisol et entraînent des coûts d'entretien et de réparation des infrastructures très élevés. Environ 550 kilomètres du chemin de fer Qinghai-Tibet, long de 2 000 kilomètres et reliant Lhassa à Xining, sont construits sur du pergélisol, passant par endroits á plus de 5 000 mètres au-dessus du niveau de la mer. Afin d'accroître la stabilité de la voie ferrée, des remblais de roches peu compactes ont été construits pour permettre à l'air de circuler librement. Sur certains tronçons, des tuyaux de ventilation enterrés dans le sol permettent à l'air froid de circuler sous la voie ferrée. Le coût de l'entretien et des réparations devrait augmenter à mesure que le réchauffement climatique prévu approfondit la couche active au-dessus du pergélisol sur le plateau.

Les Andes constituent la plus longue chaîne de montagnes du monde, s'étendant du Venezuela tropical à la pointe sud de l'Argentine. Les conditions favorables à la formation d'un pergélisol de montagne se retrouvent dans les zones de haute altitude. Il est difficile de prédire où ce pergélisol pourrait se trouver, car la topographie complexe des montagnes entraîne des schémas de formation de pergélisol extrêmement variables. Les études de terrain pouvant confirmer la présence de pergélisol sont coûteuses et difficiles d'un point de vue logistique. Le plus souvent, la répartition du pergélisol est estimée à l'aide de modèles de probabilité basés sur des variables environnementales, notamment la température annuelle moyenne de l'air, le rayonnement solaire entrant, la topographie et l'altitude.

Les glaciers rocheux actifs sont également souvent utilisés comme indicateurs de la présence de pergélisol. Ces formes de relief distinctes résultent du mouvement de descente, ou de reptation, du sol gelé et peuvent être identifiées à partir de photographies aériennes et d'images satellite. Les glaciers rocheux sont constitués d'une couche superficielle (la couche active) reposant sur une couche de pergélisol riche en glace. La quantité de glace dans la couche de pergélisol est variable (10 à 45 %). La couche superficielle de glace, de roche et de sol isole le sol gelé sous-jacent, ce qui rend les glaciers rocheux plus résistants que les glaciers de glace à l'impact du réchauffement climatique. La contribution saisonnière des glaciers rocheux au débit des cours d'eau, et donc à la sécurité de l'eau, est considérée comme importante mais n'est pas bien comprise.

Bien que les glaciers rocheux et autres caractéristiques du pergélisol soient moins manifestement affectés par le réchauffement atmosphérique que les glaciers de glace, certains signes indiquent qu'ils se dégradent eux aussi. Dans les Andes boliviennes, le réchauffement prévu pourrait entraîner la perte de 95 % du pergélisol actuel (y compris la quasi-totalité des glaciers rocheux) d'ici à 2050, et jusqu'à 99 % d'ici à 2099. Le réchauffement climatique pourrait augmenter l'épaisseur de la couche active, libérant ainsi l'eau gelée dans la partie supérieure du pergélisol. Il s'agit toutefois d'un processus lent qui n'entraîne pas d'augmentation significative du débit saisonnier de la couche active. La dégradation du pergélisol induite par le climat est également impliquée dans l'accélération de la descente de certains glaciers rocheux et dans l'augmentation des éboulements et des avalanches de pierres.

Le pergélisol dans les Andes est également affecté par l'exploitation minière et d'autres formes de développement qui peuvent augmenter la température du sol, entraînant un affaissement et la formation de thermokarst. Cette situation est très préoccupante car l'exploitation minière dans les Andes est en augmentation, ce qui entraîne des changements majeurs dans le paysage, notamment l'élimination des résidus miniers et des stériles à la surface des glaciers rocheux.



SOURCE : OBU ET AL. (2019).

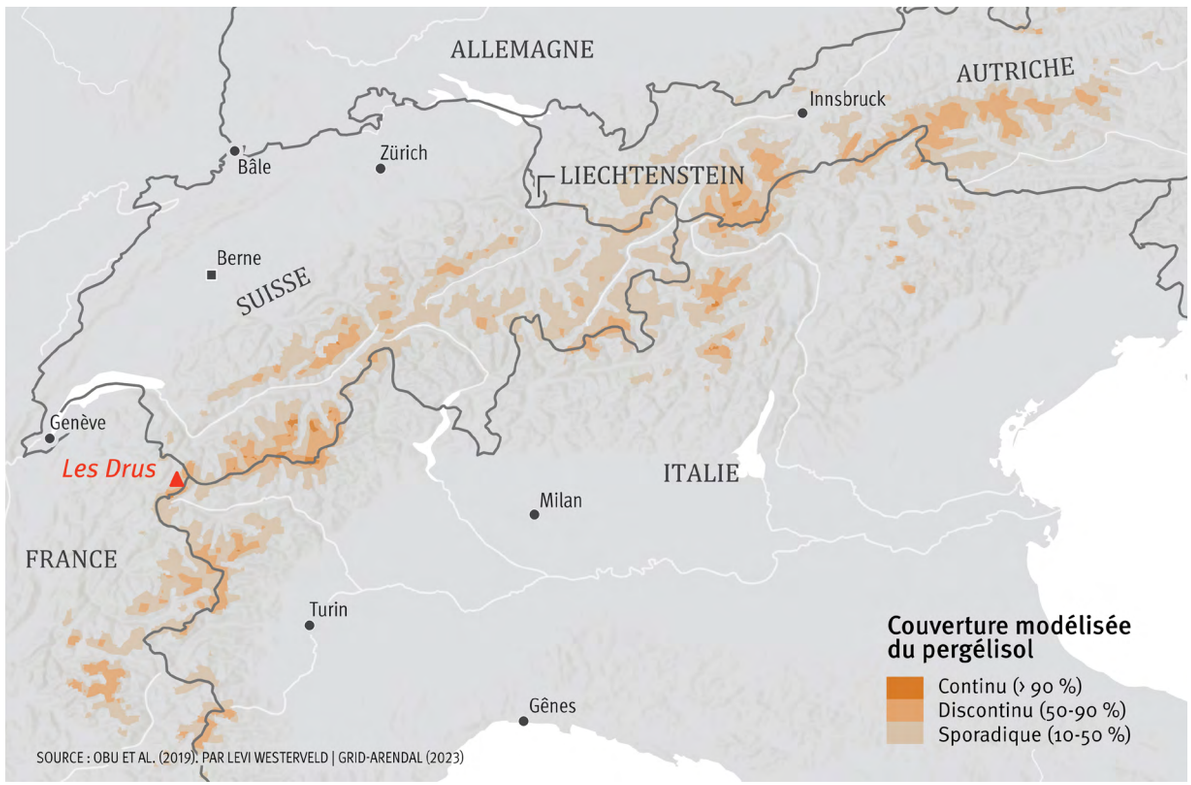
PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Le cœur gelé de l'Europe

Le pergélisol dans les Alpes

Les Alpes européennes sont une région densément peuplée et relativement accessible par rapport aux autres régions montagneuses du monde, ce qui en fait une destination très populaire pour le tourisme de montagne. Le pergélisol est une caractéristique importante des Alpes, où il se trouve à une altitude supérieure à 2 500-3 000 mètres au-dessus du niveau de la mer et couvre environ 3 % de la surface, la plus grande partie se trouvant en Suisse, suivie de l'Italie, de l'Autriche et de la France.

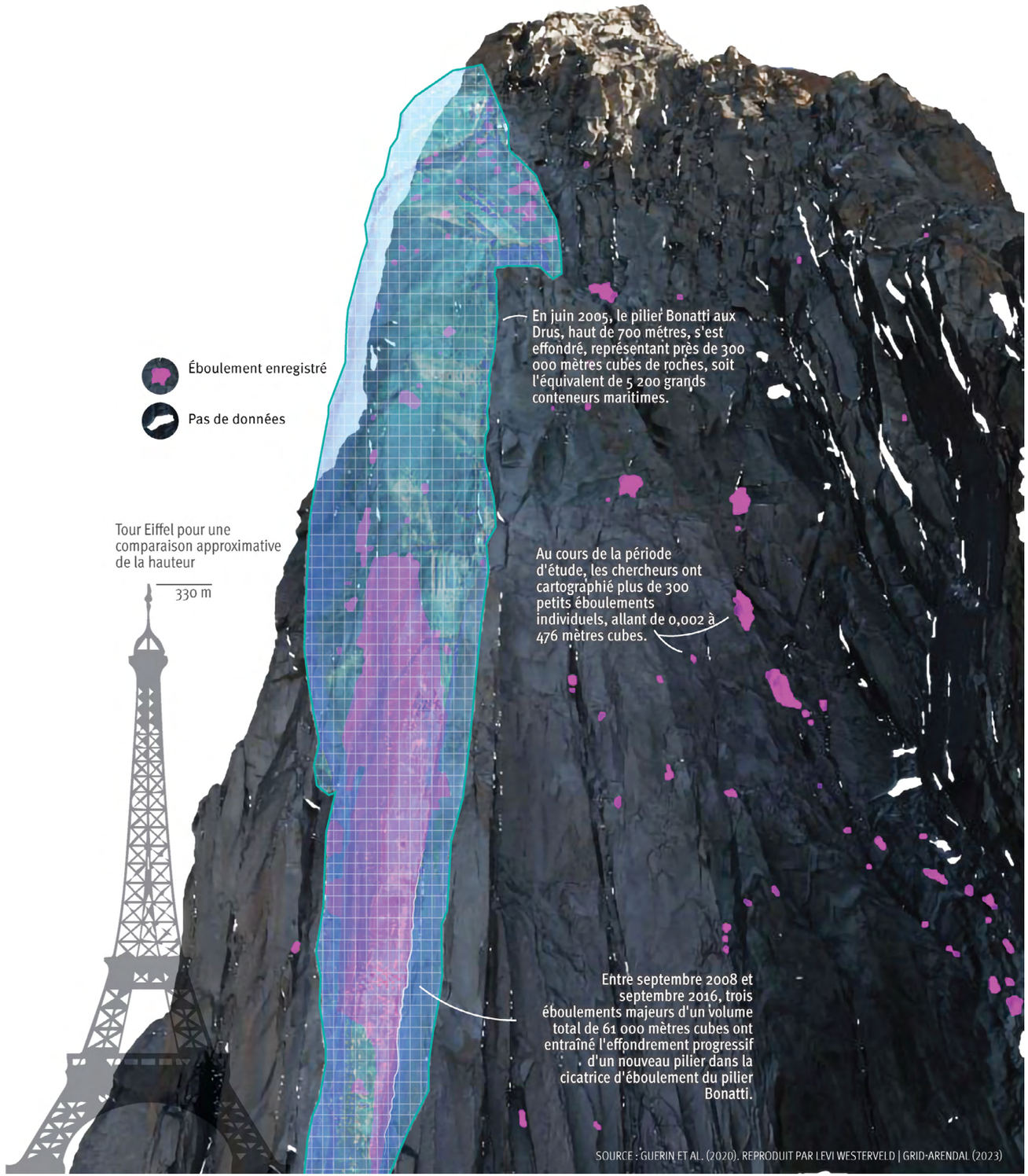
Le pergélisol des montagnes se dégrade en raison du réchauffement climatique, ce qui déstabilise les parois rocheuses sur les pentes des montagnes. Ces dernières années, des vagues de chaleur estivales ont déclenché des chutes de pierres dans les Alpes. La dégradation du pergélisol a un impact croissant sur les pratiques d'alpinisme et le tourisme de montagne en général, car les saisons d'escalade ont changé et de nombreuses voies d'alpinisme et d'escalade populaires sont devenues plus dangereuses.



Contrairement aux Andes ou à l'Himalaya Hindu Kush, les chutes de pierres dans les Alpes sont faibles mais fréquentes en été. Bien que relativement rares, des avalanches de gros blocs de pierre se produisent également. La montagne des Drus (3 754 mètres), dans le massif du Mont Blanc, dans les Alpes françaises, a été le théâtre d'importantes chutes de pierres, que les scientifiques attribuent au réchauffement climatique et à la dégradation du pergélisol. En juin 2005, le pilier Bonatti, en face ouest des Drus et haut de 700 mètres, entraînant dans sa chute près de 300 000 mètres cubes de roches, soit l'équivalent de 5 200 grands conteneurs de fret. Entre octobre 2005 et septembre 2016, les scientifiques ont utilisé la technologie laser pour scanner la paroi rocheuse granitique. Au cours de cette période, les chercheurs ont cartographié plus de 300 petits éboulements ponctuels, allant de 0,002 à 476 mètres cubes. Les enregistrements détaillés de la fréquence et du volume des chutes de pierres permettent aux chercheurs de mieux comprendre le rôle du dégel du pergélisol sur les chutes de pierres dans les régions montagneuses.

Les Alpes européennes sont le théâtre de nombreuses recherches sur le pergélisol qui ont permis d'obtenir des

ensembles de données uniques sur le pergélisol. Elles incluent notamment la plus longue série temporelle de températures de forage en Europe provenant du glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch dans les Alpes suisses, qui a débuté en 1987 ; des scans laser terrestres annuels montrant en détail comment une paroi de montagne dans le massif du Mont-Blanc a changé en 10 ans ; et une grande série de données à long terme sur le pergélisol du Cervin, l'un des sommets les plus élevés d'Europe. Des stratégies d'adaptation pour les guides de montagne ont également été développées en réponse à l'évolution de l'environnement montagnard. Ce type de données diverses est inestimable pour comprendre la dégradation du pergélisol en montagne et ses divers impacts sur l'environnement et le tourisme de montagne.



Les extrémités de la Terre I

Le pergélisol en Antarctique

Recouvert par la plus grande masse de glace de la planète, l'Antarctique est le continent le plus froid. La calotte glaciaire continentale, d'une épaisseur moyenne de plus de 2 kilomètres, isole la surface du sol des basses températures de l'air et laisse moins de 0,2 % de la surface libre de glace, principalement dans les zones côtières en bordure de la calotte glaciaire et là où les montagnes dépassent de la glace.

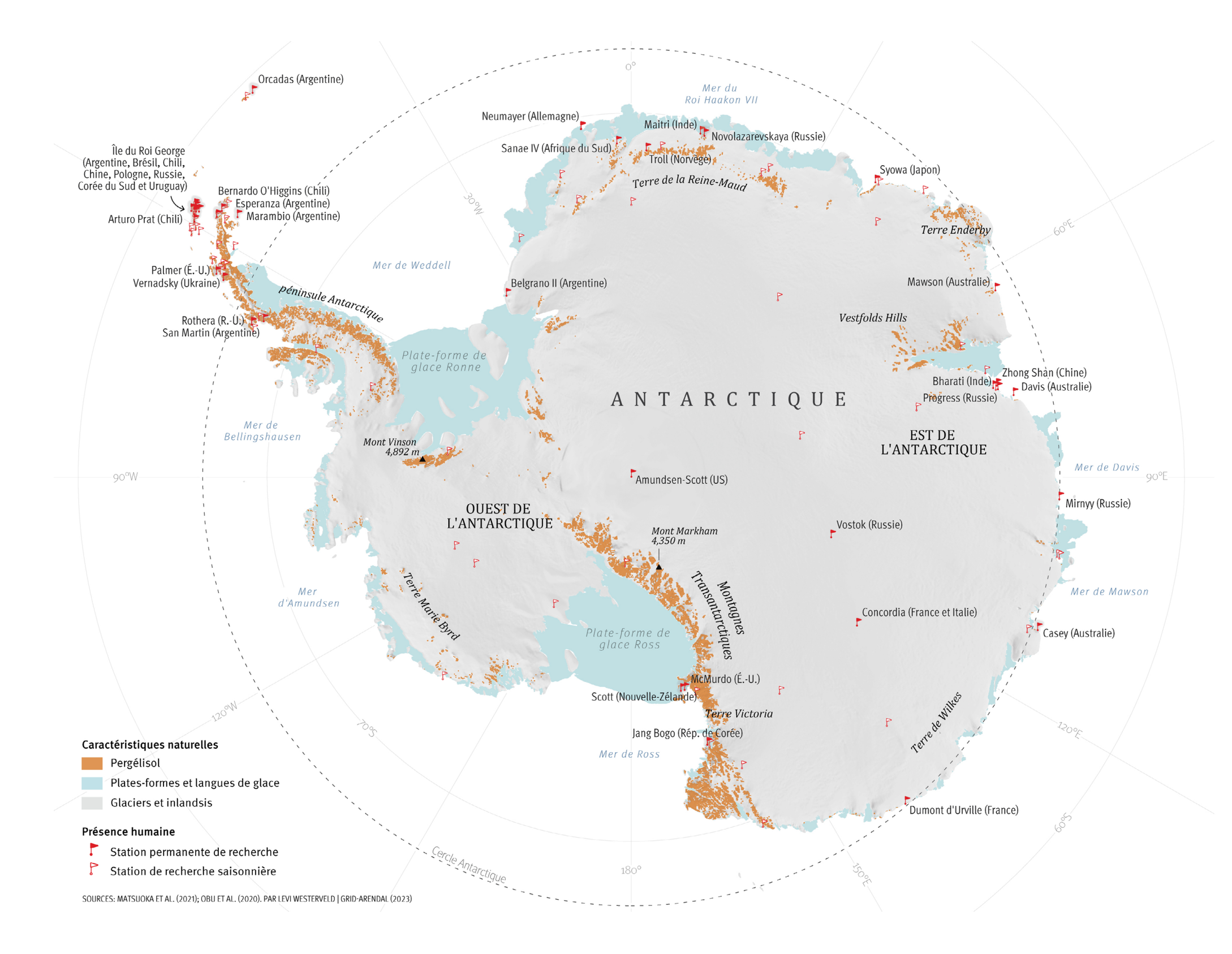
Les forages de surveillance du pergélisol sont moins nombreux en Antarctique que dans l'Arctique, mais les observations sur le terrain et la modélisation informatique montrent que le pergélisol est présent sous presque toutes les zones libres de glace. Un pergélisol pourrait exister sous la calotte glaciaire de l'Antarctique, en particulier dans les zones où la couche de glace est mince, mais comme il n'y a pas de preuves directes, on sait très peu de choses sur le pergélisol sous-glaciaire.

Le climat et la topographie de surface connaissent d'importantes variations d'un endroit à l'autre dans les zones de pergélisol de l'Antarctique. Les écarts de latitude et d'altitude entre les zones de pergélisol sont considérables . Les zones libres de glace s'étendent du niveau de la mer au sommet de la plus haute montagne, le mont Vinson en Antarctique de l'Ouest, à 4 892 mètres au-dessus du niveau de la mer. La température de l'air et la répartition de la neige au sol, les deux facteurs qui influencent le plus les températures du pergélisol antarctique, sont très variables d'un bout à l'autre du continent. L'Antarctique n'est pas seulement le continent le plus froid, mais aussi le plus sec du monde, malgré l'augmentation des précipitations dans de nombreuses régions en raison du changement climatique. Même si les températures annuelles moyennes restent bien inférieures à 0 °C dans l'ensemble de l'Antarctique, certaines zones côtières, en particulier dans la péninsule antarctique, se réchauffent rapidement, avec une tendance à des températures supérieures au point de congélation.

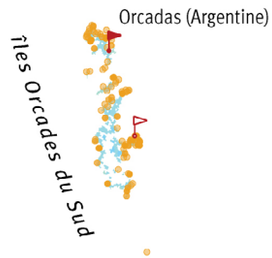
La température du sol, en tant qu'indicateur de l'existence du pergélisol, n'a fait l'objet d'une surveillance systématique qu'au cours des deux dernières décennies en Antarctique, et les données directes sur le pergélisol pour le continent sont rares. Les mesures éparses ne donnent que peu d'informations sur la variabilité spatiale, et il faut s'appuyer sur des modèles informatiques pour mieux comprendre la variabilité de la température du sol à l'échelle régionale et continentale. La modélisation indique que le pergélisol le plus froid au monde près de la surface se trouve au mont Markham, dans les montagnes transantarctiques, où la température du sol la plus basse est estimée à -36 °C.

Il n'y a pas de population humaine permanente en Antarctique. Cependant, plus de 80 bases de recherche y sont installées. Le nombre de personnes vivant et travaillant sur le continent s'élève à environ 5 000 pendant l'été austral (décembre-février), tandis qu'environ un millier de personnes restent sur place pendant les hivers sombres et froids. De nombreuses stations de recherche sont construites dans des zones côtières sur le pergélisol, dont le dégel peut constituer un risque potentiel pour l'infrastructure. Les températures moyennes annuelles au sol étant encore très basses, la plupart des bâtiments et autres infrastructures sont moins exposés aux effets de la fonte du pergélisol que ceux de l'Arctique. Toutefois, à certains endroits de la péninsule Antarctique, la fonte du pergélisol a un impact sur les infrastructures, un problème qui pourrait devenir beaucoup plus courant dans un climat plus chaud.

Le dégel du pergélisol a des répercussions locales, non seulement sur les infrastructures de recherche, mais aussi sur l'hydrologie locale. Lorsque le sol dégèle, les eaux de fonte ou de pluie s'infiltrent partiellement dans le sol au lieu de s'écouler à sa surface. L'eau étant le principal moteur physique des communautés terrestres de l'Antarctique, cela a des conséquences sur le mouvement des nutriments dans l'environnement et les impacts potentiels sur les écosystèmes et la biodiversité. Les polluants accumulés dans le pergélisol peuvent également être remobilisés dans l'environnement à la suite du dégel du pergélisol, bien que des recherches supplémentaires soient nécessaires pour comprendre leur mouvement et leur impact sur l'environnement. Contrairement à l'Arctique, le pergélisol antarctique émettra moins de gaz à effet de serre, car il contient très peu de matière organique. L'Antarctique terrestre pourrait même devenir un puits de carbone à court terme à l'avenir, si la végétation se développe avec l'augmentation des températures.



SOURCES: MATSUOKA ET AL. (2021); OBU ET AL. (2020). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

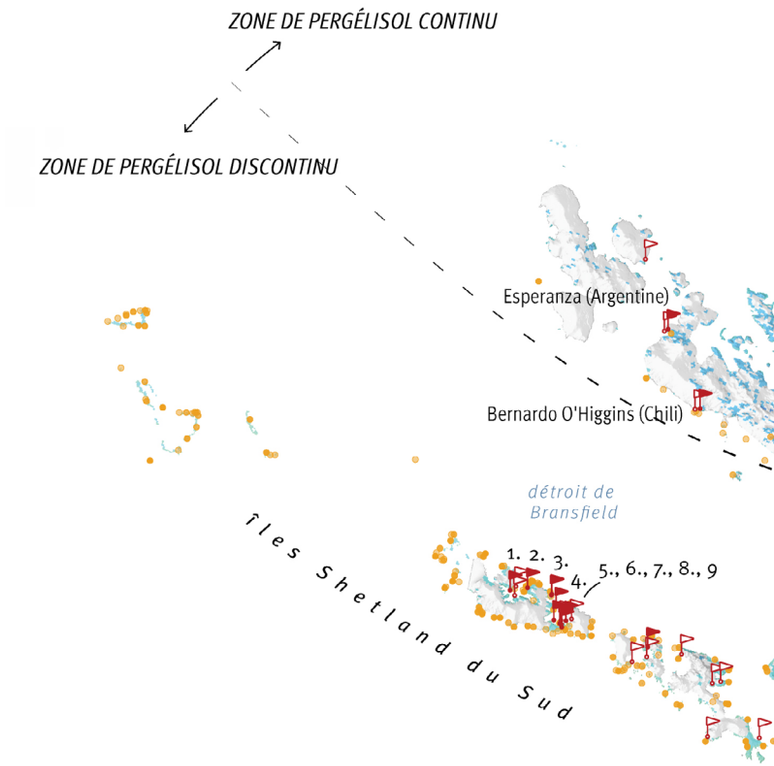


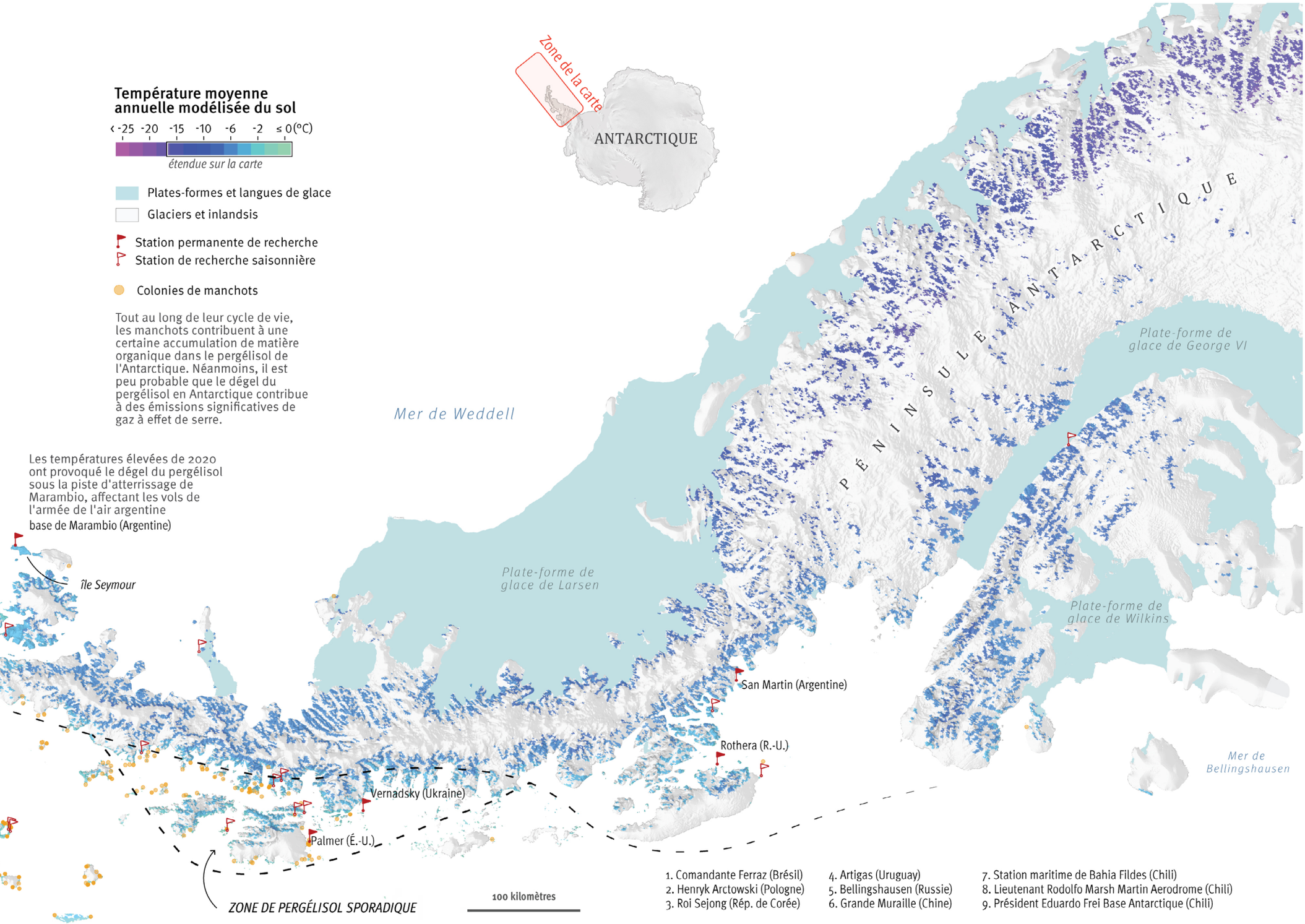
Les extrémités de la Terre II

Péninsule Antarctique

Les températures de surface modélisées les plus élevées en Antarctique se trouvent dans la péninsule antarctique, la partie la plus septentrionale du continent. Les conditions climatiques varient fortement d'un bout à l'autre de la péninsule, la côte est étant influencée par un climat continental, tandis que les parties centrale et occidentale connaissent des conditions maritimes. Les zones côtières très étroites de la péninsule antarctique présentent un pergélisol sporadique ou discontinu, et les températures les plus élevées à la surface du sol se trouvent dans les zones nord-ouest de la péninsule. Comme ailleurs, la température de l'air et l'épaisseur de la couverture neigeuse jouent un rôle important dans l'existence du pergélisol dans les zones dépourvues de glace.

Comme dans d'autres régions, le dégel du pergélisol en Antarctique constitue une menace pour les infrastructures. La piste d'atterrissage de Marambio, qui dessert une station de recherche argentine sur l'île Seymour dans la péninsule antarctique, est construite sur le pergélisol. En 2020, la température de l'air à la base de recherche argentine Esperanza, non loin de l'île Seymour, a atteint 18,4 °C, la température la plus élevée jamais enregistrée en Antarctique, confirmée par l'Organisation Météorologique Mondiale. Pendant cette vague de chaleur exceptionnelle, les vols à destination de Marambio ont été perturbés car le pergélisol avait commencé à dégeler, transformant la surface de la piste d'atterrissage en une boue profonde et aqueuse sur laquelle il n'était pas possible d'atterrir en toute sécurité. Les observations météorologiques effectuées sur la péninsule au cours des dernières décennies montrent une tendance générale à l'augmentation du nombre de ces journées extrêmement chaudes. La connaissance et la compréhension de ce type d'événements extrêmes sont importantes pour l'entretien et la sécurité des infrastructures telles que les pistes d'atterrissage et les stations de recherche sur le continent.





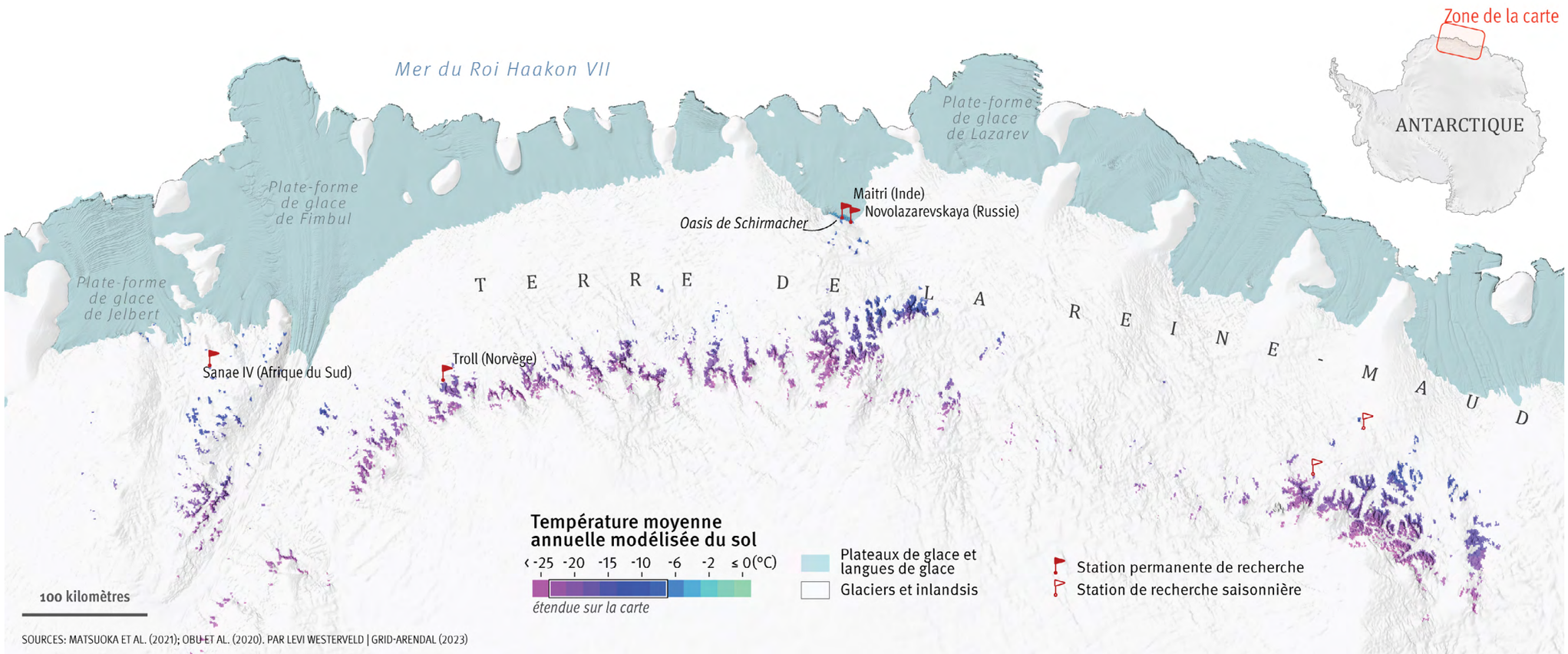
SOURCES: MAPPPD (2021); MATSUOKA ET AL. (2021); OBU ET AL. (2020). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Les extrémités de la Terre III

Terre de la Reine Maud, terre de Victoria et vallées sèches de McMurdo

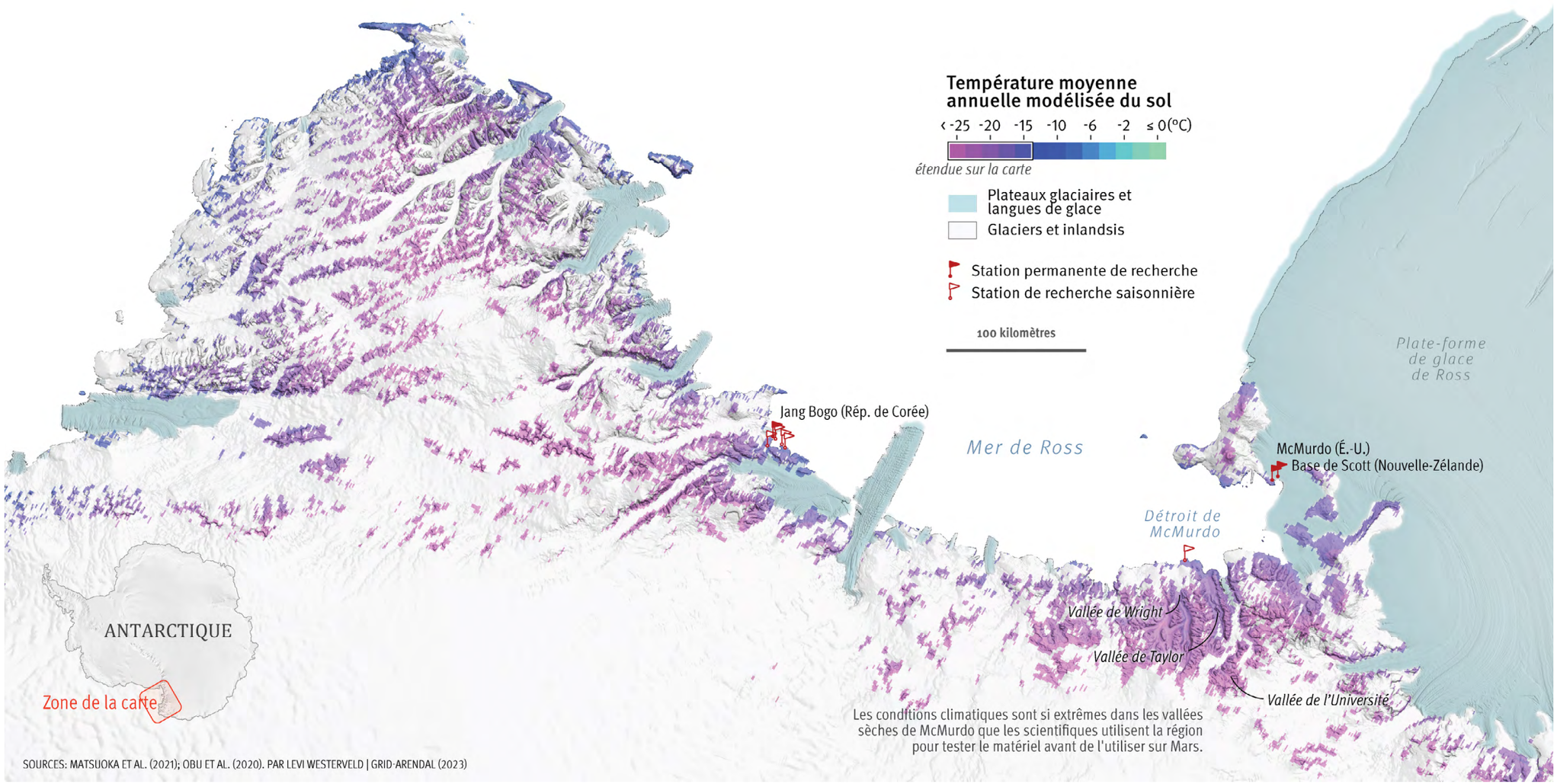
En Antarctique, sous l'effet de la gravité, de l'air froid et très dense s'écoule des hauts plateaux de l'intérieur vers les pentes abruptes de la côte. Ce processus génère des vents catabatiques, qui sont parfois très violents. Ces vents descendent du plateau de l'Antarctique de l'Est et maintiennent de grandes parties des chaînes de montagnes sèches et dépourvues de neige en Terre de la Reine-Maud. Les zones libres de glace et de neige de l'Antarctique sont souvent appelées « oasis ». L'une d'entre elles, l'oasis de Schirmacher, est une zone libre de glace qui s'étend sur 25 kilomètres de long et jusqu'à 3 kilomètres de large et qui comprend plus de 100 lacs d'eau douce. Outre la station de recherche indienne Maitri située dans l'oasis de Schirmacher, il existe 11 autres stations de recherche en Terre de la Reine Maud, la plupart d'entre elles étant construites sur des affleurements rocheux de la chaîne montagneuse où les vents forts maintiennent le sol libre de neige.

La Terre de la Reine Maud est une région de l'Antarctique où l'on observe une tendance à l'augmentation de l'accumulation de neige, ainsi qu'une hausse des températures. De l'autre côté du continent, les vallées sèches de McMurdo comptent parmi les zones les plus arides du monde, généralement classées dans la catégorie des déserts polaires hyperarides. C'est le seul endroit sur Terre où l'on trouve un pergélisol sec constitué d'un sol meuble, car sa teneur en eau est très faible et insuffisante pour cimenter les particules de sol. C'est également à cet endroit que l'on a trouvé le pergélisol le plus ancien de la planète.



SOURCES: MATSUOKA ET AL. (2021); OBU ET AL. (2020). PAR LEVI WESTERVELD | GRID-ARENDAL (2023)

Les conditions climatiques les plus extrêmes prévalent à l'intérieur des terres, à des altitudes plus élevées, comme dans la vallée de l'Université. Ces conditions ressemblent à celles de Mars, ce qui fait des vallées sèches un analogue martien où les scientifiques peuvent étudier les processus périglaciaires et les caractéristiques géomorphologiques, ainsi que leur utilisation pour diagnostiquer la présence de glace sous la surface de Mars. Contrairement à l'Arctique, où l'on trouve des populations microbiennes actives dans les sols pergélisolés, l'activité microbienne est indétectable dans les zones de haute altitude des vallées sèches. Cette absence d'activité indique les limites de la vie dans les environnements terrestres, avec des implications potentielles pour la vie dans les environnements de pergélisol extraterrestres.





© Katie Orlinsky

Au-delà de l’horizon

Le changement climatique a des répercussions profondes sur toutes les parties du globe, mais ses effets sont particulièrement prononcés sur la cryosphère de la Terre. Facilement observables et mesurables, les modifications de la neige et de la glace sur terre, des glaciers, des calottes glaciaires et de la glace de mer sont évidentes depuis longtemps. Les effets sur le pergélisol, en revanche, sont moins visibles et ont reçu moins d'attention de la part de la communauté scientifique et des habitants de l'Arctique. Pourtant, le pergélisol évolue rapidement en conséquence directe du changement climatique, ce qui présente des risques pour les populations de l'Arctique et l'environnement et a des conséquences importantes pour l'ensemble de la planète.

Les connaissances rassemblées dans cet atlas montrent à quel point le pergélisol est vital pour la régulation du climat, le maintien d'écosystèmes uniques, le soutien des infrastructures, l'influence sur l'hydrologie et le maintien des moyens de subsistance des communautés indigènes.

- Régulation du climat et science du climat : le pergélisol contient de grandes quantités de matières végétales et animales, qui sont gelées depuis des dizaines, voire des centaines de milliers d'années. Lorsque cette matière organique dégèle, elle se décompose et libère du dioxyde de carbone (CO_2) et du méthane (CH_4), deux puissants gaz à effet de serre. La libération de ces gaz exacerbe le réchauffement de la planète et le changement climatique, contribuant à une boucle de rétroaction positive qui durera encore des siècles.
- La santé : outre le carbone organique, le pergélisol stocke également des contaminants. Par exemple, le pergélisol stockent près de deux fois plus de mercure que tous les autres sols, l'océan et l'atmosphère réunis. Au fur et à mesure que le pergélisol continuera à dégeler au cours du siècle prochain, ce mercure risque d'être libéré dans l'environnement. D'autres contaminants, notamment des métaux lourds, des polluants organiques persistants et des agents microbiologiques, sont également piégés dans le pergélisol, tant qu'il reste gelé. Toutefois, si le pergélisol venait à dégèler, ils constituent un risque pour la santé humaine et animale.
- Déstabilisation et érosion : le dégel du pergélisol déstabilise considérablement le sol. Les communautés côtières voient leur littoral s'effriter, les lacs s'assécher soudainement et les infrastructures menacées. Cette déstabilisation entraîne des coûts pour la santé humaine et animale, l'économie et la société. Le coût des dommages causés aux infrastructures pourrait à lui seul dépasser 276 milliards de dollars américains au cours des 40 prochaines années.
- Services écosystémiques et biodiversité : le pergélisol abrite une flore et une faune spécialisées, adaptées aux conditions froides et gelées. Ces écosystèmes constituent un habitat pour des espèces qui sont uniquement adaptées aux environnements du pergélisol et contribuent à la biodiversité mondiale. Avec l'évolution du pergélisol, certains lacs pourraient s'assécher et disparaître, les côtes riches en glace s'érodent et la végétation de la toundra est remplacée par des arbustes et des arbres. Ces changements et d'autres modifications de l'habitat peuvent avoir de graves conséquences pour les espèces qui en dépendent.
- Ressources en eau et qualité de l'eau : le pergélisol joue un rôle dans la régulation de l'hydrologie régionale. Il peut agir comme une barrière à la circulation de l'eau et influencent le flux des rivières et des ruisseaux. Certaines régions de pergélisol stockent d'importantes quantités d'eau douce sous forme de glace. Le dégel du pergélisol pourrait libérer cette eau, ce qui pourrait avoir un impact sur les ressources en eau locales et même sur le niveau des mers.
- Les communautés autochtones : les peuples autochtones possèdent des connaissances et des pratiques culturelles uniques associées aux environnements pergélisolés, et les changements dans les conditions du pergélisol peuvent affecter profondément leurs modes de vie. Comprendre les impacts des changements en cours et déterminer les meilleures stratégies d'adaptation nécessite un échange respectueux entre les praticiens de la science et les détenteurs de savoirs locaux et traditionnels.
- L'histoire de la Terre : l'étude des carottes de pergélisol peut fournir des informations sur le climat passé et sur la résistance du pergélisol pendant les périodes plus chaudes. Ces informations peuvent nous renseigner sur les rythmes naturels et les conséquences des changements, indépendamment de l'action de l'homme.

Généralement, les composantes sociales, physiques et sanitaires du dégel du pergélisol ont été étudiées de manière isolée, ce qui a conduit à des options politiques inadéquates incapables de tenir compte de la nature holistique de la menace. Par exemple, les rejets de contaminants affectent directement la faune et la flore, qui sont elles-mêmes exploitées pour l'alimentation. La défaillance des infrastructures menace directement l'eau et l'assainissement dans les communautés, ce qui a un impact considérable sur la santé et le bien-être. Il est nécessaire d'adopter une approche intégrée et participative des questions complexes liées au changement climatique, au dégel du pergélisol, aux dommages causés aux infrastructures, aux contaminants, à la santé et au bien-être, et de trouver des solutions fondées sur les cadres culturels, naturels et sociaux des communautés locales.

Alors que le changement climatique continue d'affecter les régions de pergélisol, la compréhension et la gestion de ces écosystèmes deviennent de plus en plus importantes pour le bien-être de notre planète et de ses habitants. C'est aussi le moment de repenser la science du pergélisol, de favoriser la co-conception et de partager la participation à l'observation, à la production de connaissances et à leurs bénéfices. Les thèmes de recherche les plus importants sont les suivants :

- Les projections actuelles des impacts de la fonte du pergélisol sur le cycle du carbone ne tiennent pas compte de processus et de liens importants. Il est nécessaire d'intégrer la mobilisation actuellement observée du carbone sur terre et sous l'océan dans nos modèles de changement afin de mieux comprendre les défis multigénérationnels des rétroactions à long terme. Étant donné que le dégel du pergélisol pourrait déclencher une perte de carbone qui se poursuivra pendant des siècles, ces émissions futures doivent également être prises en compte dans la modélisation.
- Le dégel du pergélisol, sous ses formes progressives et abruptes, libérera des polluants, mais l'ampleur et le moment de cette libération n'ont pas pas encore été quantifiés.
- Une nouvelle approche, incluant des modèles de pergélisol projetant la durée de vie des infrastructures jusqu'au vingt-deuxième siècle, est nécessaire pour fournir aux planificateurs une vision à long terme et une capacité de prise de décision.
- Il est urgent d'évaluer les risques pour la faune et la santé humaine qui résultent des modifications de la qualité de l'eau dues au dégel du pergélisol et d'impliquer les communautés dans l'élaboration de solutions fondées sur la nature pour améliorer leur bien-être.
- L'interaction entre les activités humaines, le changement climatique et le pergélisol engendre de nombreux risques susceptibles d'avoir des répercussions environnementales, socioculturelles, économiques et sanitaires, importantes sur les communautés de l'Arctique. Il faut redoubler d'efforts pour mettre au point des mesures d'adaptation, d'atténuation et de récupération pouvant être mises en œuvre dans les régions éloignées.
- Un effort ciblé pour cartographier les impacts interconnectés du dégel du pergélisol sur le programme One Health est nécessaire pour identifier les risques et pour prévenir et gérer les risques pour la santé des humains, des animaux et de notre environnement commun.
- Les services écosystémiques du pergélisol arctique (APES) doivent être identifiés et classés pour souligner la valeur mondiale du pergélisol.

Cet atlas paraît à un moment où le sentiment de pérennité de l'humanité est incertain. L'activité humaine repousse les limites de la planète. Il est dans notre intérêt de préserver autant de pergélisol que possible. Pour y parvenir, il faut une transformation sociétale globale, une rupture avec notre dépendance aux combustibles fossiles et une réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Pour ceux qui vivent sur le pergélisol, des stratégies urgentes sont nécessaires pour faire face aux changements en cours. Après s'être adaptées à la vie sur le pergélisol, ces populations doivent maintenant s'adapter à un environnement déstabilisé où les habitations, les entreprises et les infrastructures de transport sont toutes menacées. Là où l'on comptait activement sur le pergélisol pour limiter les contaminants et les agents pathogènes, de nouvelles solutions s'imposent à mesure que le dégel du pergélisol s'amplifie et que son endiguement échoue.

L'impact à long terme le plus important de la fonte du pergélisol pour la communauté mondiale est la libération substantielle de gaz à effet de serre pour les siècles à venir, ce qui nécessitera une compensation de la part des générations futures. La durée et l'ampleur de ce phénomène sont encore à l'étude, mais du point de vue du pergélisol, le réchauffement actuel est déjà trop important. Il est urgent d'agir pour éviter autant que possible le dégel du pergélisol, et il n'est pas trop tard si nous agissons maintenant. En réduisant considérablement nos émissions de gaz à effet de serre, nous pouvons protéger le climat mondial contre le relâchement d'émissions incontrôlables provenant du pergélisol et œuvrer en faveur d'un changement positif pour le pergélisol et la planète dans son ensemble.

Glossaire

Abrasion thermique - Destruction du littoral gelé par l'action mécanique et thermique des vagues.

Accord de Paris - Traité international adopté en 2015 par 194 pays. Ce traité a pour objectif à long terme de maintenir le réchauffement de la température moyenne de la planète bien en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels.

Aérobie - En présence d'oxygène, généralement de l'air est disponible

Affaissement du sol - Affaissement ou mouvement vers le bas de la surface de la Terre ; dans les régions de pergélisol, l'affaissement peut résulter de la fonte de la glace souterraine.

Alass - Dépression ou lac de dégel drainé, généralement recouvert de prairies, résultant de la fonte du pergélisol riche en glace.

Amplification arctique - Phénomène de réchauffement plus rapide dans les régions arctiques par rapport à la moyenne mondiale.

Anaérobie - En l'absence d'oxygène, généralement parce que tout l'oxygène a été consommé et qu'il n'y a pas d'air disponible.

Benthique - Fond d'une masse d'eau, comme un océan, un lac ou une rivière.

Bioaccumulation - Accumulation progressive d'une substance chimique (nocive) dans un organisme. Dans les chaînes alimentaires, les produits chimiques ont tendance à se concentrer davantage dans les organismes situés plus haut dans la chaîne.

Boucle de rétroaction négative - Processus dans lesquels le résultat atténue la cause.

Boucle de rétroaction positive - Processus dans lesquels le résultat renforce la cause.

Carbone - Principal élément de la vie sur Terre et principal élément des gaz à effet de serre. Il est présent dans les composés organiques et inorganiques, principalement selon que le carbone est lié à l'hydrogène (comme dans la plupart des formes de vie) ou non (par exemple dans les minéraux).

Coin de glace - Corps de glace qui se forme lorsque des fissures verticales s'ouvrent dans le sol pendant l'hiver et se remplissent ensuite d'eau de fonte au printemps. Le gel de l'eau crée une veine de glace verticale qui s'élargit d'année en année au fur et à mesure que le processus se répète, et qui est généralement le plus large au sommet. Si plusieurs coins de glace atteignent une taille suffisante et se rejoignent, ils créent des polygones de coins de glace.

Conductivité hydraulique - Facilité relative avec laquelle un fluide peut traverser un sol ou une roche.

Convection - Flux circulaire de gaz ou de liquide résultant de différences de densité, par exemple lorsque l'eau chaude monte et que l'eau froide descend.

Couche active - Couche supérieure du sol du pergélisol qui gèle et dégèle.

Cycle du carbone - Mouvement du carbone entre les différents réservoirs (terre, océan, atmosphère) de la Terre.

Dégel brutal - Dégel rapide du pergélisol, généralement dû à l'érosion, à un glissement de terrain ou à un autre processus catastrophique.

Dégel progressif - Dégel lent du pergélisol sous l'effet du réchauffement.

Dénudation thermique - Érosion des rivages causée par le réchauffement et le dégel du pergélisol au-dessus de la ligne d'eau.

Dernier Maximum Glaciaire - Période géologique au cours de laquelle les glaciers étaient les plus grands, il y a environ 25 000 ans.

Éboulements dus au dégel rétrograde - Forme de relief du pergélisol causée par le dégel d'un pergélisol riche en glace, entraînant l'effondrement d'une pente et le recul d'un mur de tête.

Gaz à effet de serre - Substances chimiques présentes dans l'atmosphère qui absorbent la chaleur réfléchie par la surface de la Terre, la piègent et réchauffent l'atmosphère ; les principaux gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau, le méthane (CH_4, un composé organique) et le dioxyde de carbone (CO_2, un composé carboné inorganique).

Glacier rocheux - Forme de relief du pergélisol constituée de débris rocheux gelés dans ou sur la glace.

Glissements de décollement de la couche active - Rupture(s) de pente dans les zones de pergélisol, dans laquelle la couche active se détache du sol gelé sous-jacent et glisse vers le bas de la pente.

Haut Arctique - Partie la plus septentrionale de l'Arctique, définie par son climat et sa végétation.

Infrastructures linéaires - Éléments construits le long d'une ligne continue, tels que les routes, les chemins de fer, les utilidors et les pipelines.

Infrastructure ponctuelle - Éléments bâtis non reliés entre eux, tels qu'un aéroport, une plate-forme de forage ou un port.

Inondation par débordement - Libération soudaine d'un grand volume d'eau, par exemple d'un lac naturellement endigué. Ce type d'inondation n'est pas fréquent mais peut causer beaucoup de dégâts.

Microbes méthanotrophes - Micro-organismes tels que les bactéries ou les archées qui utilisent le méthane comme source de carbone et d'énergie chimique.

Modèle du système terrestre - Modèle informatique des processus physiques, chimiques et biologiques du système terrestre.

Pergélisol - Sol dont la température est égale ou inférieure à 0 °C pendant au moins deux années consécutives.

Pergélisol continu - Pergélisol qui recouvre 90 % ou plus du sol d'une région.

Pergélisol discontinu - Pergélisol qui recouvre 50 à 90 % du sol d'une région.

Pergélisol isolé - Pergélisol qui recouvre moins de 10 % du sol d'une région.

Pergélisol sporadique - Pergélisol qui recouvre 10 à 50 % du sol d'une région.

Période glaciaire - voir la définition du Dernier Maximum Glaciaire

Période interglaciaire - Période géologique au cours de laquelle les températures chaudes de l'air font rétrécir les glaciers et les calottes glaciaires. Une période interglaciaire se situe généralement entre des périodes glaciaires plus froides au cours desquelles les masses de glace augmentent.

Pingo - Grande colline à peu près conique avec un noyau de glace, recouverte de terre et de végétation.

Production primaire - Création d'énergie chimique pour les organismes vivants à partir d'un substrat inorganique, par exemple par le biais de la photosynthèse.

Puits de carbone - Tout ce qui absorbe et accumule plus de carbone qu'il n'en émet.

Ravines d'érosion - Tranchées formées par le lessivage des matériaux du sol.

Scénario climatique - Résultats de la modélisation informatique du climat futur de la Terre comprenant des estimations des futures émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine. Ces scénarios sont souvent appelés « projections » ou « trajectoires » futures et comprennent des solutions de rechange à émissions faibles, modérées et élevées. Projections des futures émissions de gaz à effet de serre et de leur impact sur le climat, parfois classées en faibles/intermédiaires/élevées en fonction du taux d'augmentation de la température.

Séquestration du carbone - Capture et stockage du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère.

Soulèvement par le gel - soulèvement de la surface du sol pendant le gel.

Talik - Zone de sol non gelé à l'intérieur du pergélisol.

Thermokarst - Dépressions dans le paysage formées par le dégel du pergélisol et la fonte de la glace souterraine, qui abaissent la surface du sol (voir affaissement du sol). Ces dépressions peuvent se remplir d'eau pour former des étangs ou des lacs thermokarstiques.

Thermosiphon - Dispositif passif d'échange de chaleur utilisant la convection pour refroidir le sol.

Turbidité - Mesure de la clarté relative d'un liquide.

Yedoma - Classe de dépôts de pergélisol riches en carbone et en glace que l'on trouve en Sibérie (Russie) et dans certaines parties de l'Alaska (États-Unis) et du Yukon (Canada).

Zoonoses - Maladies infectieuses qui sont passées de l'animal à l'homme

Acronymes

ACD	Dynamique côtière de l'Arctique
ACE	Remblai par convection d'air
ACPR	Région Arctique circumpolaire de pergélisol
AMAP	Programme de surveillance et d'évaluation de l'Arctique
API	Année polaire internationale
APPVI	Indice de vulnérabilité de la population du pergélisol arctique
AR6	Sixième rapport d'évaluation
CALM	Surveillance de la couche active circumpolaire
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les Changements Climatiques
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
Gt	Gigaton (10^9 t, 10^{15} g) = un milliard de tonnes
GTN-P	Réseau terrestre mondial pour le pergélisol
HKH	Hindou-Kouch-Himalaya
IPA	Association Internationale du Pergélisol
NDVI	Indice de végétation par différence normalisée
NSIDC	Centre national de données sur la neige et la glace
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
PCR	Voie de concentration représentative
Pg	Pétagramme (10^{15} g) = un milliard de tonnes
PNUE	Programme des Nations unies pour l'Environnement
POP	Polluants Organiques Persistants
PRB	Produit Régional Brut
SDWG	Groupe de travail sur le développement durable du Conseil de l'Arctique
Tg	Teragramme (10^{12} g) = un million de tonnes
WWF	Fonds Mondial pour la Nature

Références (du document original)

Avant-propos

European Commission and High Representative of the Union for Foreign Affairs and Security Policy (2021). Joint Communication to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A Stronger EU Engagement for a Peaceful, Sustainable and Prosperous Arctic (JOIN(2021) 27 Final), Brussels, 13.10.2021. https://www.eeas.europa.eu/sites/default/files/2_en_act_part1_v7.pdf. Accessed 9 June 2023.

Schuur, E.A.G., Abbott, B.W., Commane, R., Ernakovich, J., Euskirchen, E., Hugelius, G. et al. (2022). Permafrost and climate change: Carbon cycle feedbacks from the warming Arctic. Annual Review of Environment and Resources 47, 343–371. https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-environ-012220-011847.

Prologue

Arctic Monitoring and Assessment Programme (2021). AMAP Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts. AMAP, Tromsø, Norway. viii+148. https://www.amap.no/documents/doc/amap-arctic-climate-change-update-2021-key-trends-and-impacts/3594.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). Sections. In Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, Lee, H. and Romero, J. (eds.). Geneva, Switzerland. 35-115. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/.

Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K. et al. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. Communications Earth & Environment 3(168). https://www.nature.com/articles/s43247-022-00498-3.

Le congélateur de la Terre

Sols gelés

Texte

Dobinski, W. (2011). Permafrost. Earth-Science Reviews 108(3–4), 158–169. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825211000894.

Obu, J. (2021). How much of the Earth's surface in underlain by permafrost? Journal of Geophysical Research: Earth Surface 126(5), e2021JF006123. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021JF006123.

Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km2 scale. Earth-Science Reviews 193, 299–316. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825218305907.

Overduin, P.P., von Deimling, T.S., Miesner, F., Grigoriev, M.N., Ruppel, C., Vasiliev, A. et al. (2019). Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP). Journal of Geophysical Research: Oceans 124(6), 3490–3507. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018JC014675.

Smith, S.L., Romanovsky, V.E., Lewkowicz, A.G., Burn, C.R., Allard, M., Clow, G.D. et al. (2010). Thermal state of permafrost in North America: A contribution to the International Polar Year. Permafrost Periglacial Processes 21(2), 117–135. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppp.690.

Van Everdingen, R.O. (ed.) (2005). Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms. Calgary, Canada: International Permafrost Association. https://globalcryospherewatch.org/reference/glossary_docs/Glossary_of_Permafrost_and_Ground-Ice_IPA_2005.pdf.

Way, R.G. (2018). Permafrost, 4 June. https://indigenouspeoplesatlasofcanada.ca/article/tundra-and-permafrost/. Accessed 9 May 2023.

Cartes

Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-Science Reviews 193, 299–316. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023.

Overduin, P.P., Schneider von Deimling, T., Miesner, F., Grigoriev, M.N., Ruppel, C., Vasiliev, A. et al. (2019). Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP). Journal of Geophysical Research: Oceans 124(6), 3490–3507. https://doi.org/10.1029/2018JC014675.

Description du pergélisol

Texte

Christiansen, H.H., Matsuoka, N. and Watanabe, T. (2016). Progress in understanding the dynamics, internal structure and palaeoenvironmental potential of ice wedges and sand wedges. Permafrost and Periglacial Processes 27(4), 365–376. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppp.1920.

Dobinski, W. (2011). Permafrost. Earth-Science Reviews 108(3–4), 158–169. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825211000894.

Godin, E. and Fortier, D. (2012). Geomorphology of a thermo-erosion gully, Bylot Island, Nunavut, Canada. Canadian Journal of Earth Sciences 49(8), 979–986. https://cdnsciencepub.com/doi/10.1139/e2012-015.

GRID-Arendal (2020). Coastal and offshore permafrost in a changing Arctic, 13 October. https://storymaps.arcgis.com/stories/c163de04de7849cdb917fee88015dd73. Accessed 9 June 2023.

Mackay, J.R. (1998). Pingo growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula Area, Western Arctic Coast, Canada: A long-term field study. Géographie Physique et Quaternaire 52(3), 271–323. https://www.erudit.org/en/journals/gpq/1998-v52-n3-gpq153/004847ar/.

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. https://www.nature.com/articles/ncomms13043.

Paull, C.K., Ussler, W., Dallimore, S.R., Blasco, S.M., Lorenson, T.D., Melling, H. et al. (2007). Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates. Geophysical Research Letters 34(1), L01603. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2006GL027977.

Prowse, T.D. and Brown, K. (2010). Appearing and disappearing lakes in the Arctic and their impacts on biodiversity. In Arctic Biodiversity Trends 2010: Selected Indicators of Change. Kurvits, T., Alfthan, B. and Mork, E. (eds.). Akureyri, Iceland: Ásprent Stell. Chapter 13. 68–70. https://www.caff.is/assessment-series/162-arctic-biodiversity-trends-2010-selected-indicators-of-change.

United States of America, National Park Service (2017). Ice Wedges in Alaska's National Parks. [online video]. 9 December. https://www.youtube.com/watch?v=-_lHbqLz530&ab_channel=AlaskaExtreme. Accessed 9 May 2023.

Van Everdingen, R.O. (ed.) (2005). Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms. Calgary, Canada: International Permafrost Association. https://globalcryospherewatch.org/reference/glossary_docs/Glossary_of_Permafrost_and_Ground-Ice_IPA_2005.pdf.

Éternellement gelé

Texte

Angelopoulos, M., Overduin, P.P., Miesner, F., Grigoriev, M.N. and Vasiliev, A.A. (2020). Recent advances in the study of Arctic submarine permafrost. Permafrost and Periglacial Processes 31(3), 442–453. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ppp.2061.

Hughes, P.D., Gibbard, P.L. and Ehlers, J. (2013). Timing of glaciation during the last glacial cycle: Evaluating the concept of a global 'Last Glacial Maximum' (LGM). Earth-Science Reviews 125, 171–198. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825213001190.

Osterkamp, T.E. and Burn, C.R. (2003). Permafrost. In Encyclopedia of Atmospheric Sciences Holton, J.R. (ed.). Academic Press. 1717–1729. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B0122270908003110.

National Snow and Ice Data Center (2020). Glaciers Quick Facts. https://nsidc.org/learn/parts-cryosphere/glaciers/glacier-quick-facts. Accessed 9 May 2023.

Vandenberghe, J., French, H.M., Gorbunov, A., Marchenko, S., Velichko, A.A., Jin, H. et al. (2014). The Last Permafrost Maximum (LPM) map of the Northern Hemisphere: Permafrost extent and mean annual air temperatures, 25–17 ka BP. Boreas 43(3), 652–666. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/bor.12070.

Cartes

Ehlers, J., Gibbard, P.L. and Hughes, P.D. (eds.) (2011). Quaternary Glaciations – Extent and Chronology. Amsterdam: Elsevier. https://booksite.elsevier.com/9780444534477/.

Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Cattani, O., Dreyfus, G., Falourd, S., Hoffmann, G. et al. (2007). Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. Science 317(5839), 793–796. https://doi.org/10.1126/science.1141038.

Lindgren, A., Hugelius, G., Kuhry, P., Christensen, T.R. and Vandenberghe, J. (2015). GIS-based maps and area estimates of northern hemisphere permafrost extent during the Last Glacial Maximum. Permafrost and Periglacial Processes 27(1), 6–16. https://doi.org/10.1002/ppp.1851.

Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-Science Reviews 193, 299–316. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023.

Overduin, P.P., Schneider von Deimling, T., Miesner, F., Grigoriev, M.N., Ruppel, C., Vasiliev, A. et al. (2019). Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP). Journal of Geophysical Research: Oceans 124(6), 3490–3507. https://doi.org/10.1029/2018JC014675.

Un équilibre glacial

Texte

Canada, Northwest Territories Geological Survey (no date). Permafrost thaw causes lake drainage and flow of debris, Peel Plateau, Northwest Territories, Canada. https://www.nwtgeoscience.ca/services/permafrost-thaw-slumps/video-permafrost-thaw-causes-lake-drainage-peel-plateau-nwt. Accessed 9 May 2023.

Forbes, D.L., Craymer, M.R., James, T.S. and Whalen, D. (2022). Subsidence drives habitat loss in a large permafrost delta, Mackenzie River outlet to the Beaufort Sea, western Arctic Canada. Canadian Journal of Earth Sciences 59(11), 914–934. https://cdnsciencepub.com/doi/pdf/10.1139/cjes-2021-0127.

Forbes, D.L., Manson, G.K., Whalen, D.J.R., Couture, N.J. and Hill, P.R. (2014). Coastal products of marine transgression in cold-temperate and high-latitude coastal-plain settings: Gulf of St Lawrence and Beaufort Sea. Geological Society, London, Special Publications 388, 131–163. https://www.lyellcollection.org/doi/10.1144/SP388.18.

Jones, B.M., Grosse, G., Farquharson, L.M., Roy-Léveillée, P., Veremeeva, A., Kanevskiy, M.Z. et al. (2022). Lake and drained lake basin systems in lowland permafrost regions. Nature Reviews Earth & Environment 3, 85–98. https://www.nature.com/articles/s43017-021-00238-9.

Kokelj, S.V., Kokoszka, J., van der Sluijs, J., Rudy, A.C.A., Tunnicliffe, J., Shakil, S. et al. (2021). Thaw-driven mass wasting couples slopes with downstream systems, and effects propagate through Arctic drainage networks. The Cryosphere 15(7), 3059–3081. https://tc.copernicus.org/articles/15/3059/2021/.

Liljedahl, A., Boike, J., Daanen, R.P., Fedorov, A.N., Frost, G.V., Grosse, G. et al. (2016). Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. Nature Geoscience 9, 312–318. https://www.nature.com/articles/ngeo2674.

Nitze, I., Grosse, G., Jones, B.M., Romanovsky, V.E. and Boike, J. (2018). Remote sensing quantifies widespread abundance of permafrost region disturbances across the Arctic and Subarctic. Nature Communications 9, 5423. https://www.nature.com/articles/s41467-018-07663-3.

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. https://www.nature.com/articles/ncomms13043.

Prowse, T.D. and Brown, K. (2010). Appearing and disappearing lakes in the Arctic and their impacts on biodiversity. In Arctic Biodiversity Trends 2010: Selected Indicators of Change. Kurvits, T., Alfthan, B. and Mork, E. (eds.). Akureyri, Iceland: Áusprent Stell. Chapter 13. 68–70. https://www.caff.is/assessment-series/162-arctic-biodiversity-trends-2010-selected-indicators-of-change.

Streletskiy, D. (2021). Permafrost degradation. In Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters. Haeberli, W. and Whiteman, C. (eds.). Amsterdam, Netherlands, Oxford, UK and Cambridge, US: Elsevier. Chapter 10. 297–322. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128171295000214.

Van Everdingen, R.O. (ed.) (2005). Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms. Calgary, Canada: International Permafrost Association. https://globalcryospherewatch.org/reference/glossary_docs/Glossary_of_Permafrost_and_Ground-Ice_IPA_2005.pdf.

Cartes

Brown, J., Ferrians, O., Heginbottom, J.A. and Melnikov, E. (2002). Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. https://nsidc.org/sites/default/files/ggd318-v002-userguide.pdf. Accessed 20 June 2023. DOI: 10.7265/SKBG-KF16

L'ennemi intérieur

Texte

Angelopoulos, M., Overduin, P.P., Miesner, F., Grigoriev, M.N. and Vasiliev, A.A. (2020). Recent advances in the study of Arctic submarine permafrost. Permafrost and Periglacial Processes 31(3), 442–453. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ppp.2061.

Biskaborn, B.K., Lanckman, J.-P., Lantuit, H., Elger, K., Streletskiy, D.A., Cable, W.L. et al. (2015). The new database of the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P), Earth System Science Data 7(2), 245–259. https://essd.copernicus.org/articles/7/245/2015/.

Biskaborn, B.K., Smith, S.L., Noetzli, J., Matthes, H., Vieira, G., Streletskiy, D.A. et al. (2019). Permafrost is warming at a global scale. Nature Communications 10, 264. https://www.nature.com/articles/s41467-018-08240-4.

Dmitrenko, I.A., Kirillov, S.A., Tremblay, L.B., Kassens, H., Anisimov, O.A., Lavrov, S.A. et al. (2011). Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability. Journal of Geophysical Research: Oceans 116(C10), C10027. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011JC007218.

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(23), 6573–6593. https://bg.copernicus.org/articles/11/6573/2014/.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). Summary for Policymakers. In Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M.M.B., Allen, S.K., Boschung, J. et al. (eds.). Cambridge, UK and New York, US: Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf.

Schuur, T. (2019). Permafrost and the global carbon cycle, 30 October. https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2019/ArtMID/7916/ArticleID/844/Permafrost-and-the-Global-Carbon-Cycle. Accessed 9 May 2023.

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://www.nature.com/articles/nature14338.

Cartes

Hugelius, G., Bockheim, J.G., Camill, P., Elberling, B., Grosse, G., Harden, J.W. et al. (2013). A new data set for estimating organic carbon storage to 3 m depth in soils of the northern circumpolar permafrost region. Earth System Science Data 5(2), 393–402. https://doi.org/10.5194/essd-5-393-2013.

Miesner, F., Overduin, P.P., Grosse, G., Strauss, J., Langer, M., Westermann, S. et al. (2023). Subsea permafrost organic carbon stocks are large and of dominantly low reactivity. Scientific Reports 13, 9425. https://doi.org/10.1038/s41598-023-36471-z.

Strauss, J., Laboor, S., Fedorov, A.N., Fortier, D., Froese, D.G., Fuchs, M. et al. (2016). Database of Ice-Rich Yedoma Permafrost (IRYP). https://doi.org/10.1594/PANGAEA.861733. Accessed 20 June 2023.

Quand la glace s'étend

Texte

Bennett, M.R. (2009). Pingos. In Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments. Gornitz, V. (ed.). Dordrecht, Netherlands: Springer. 783–784. https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-1-4020-4411-3_187.

Mackay, J.R. (1979). Pingos of the Tuktoyaktuk Peninsula Area, Northwest Territories. Géographie Physique et Quaternaire 33(1), 3–61. https://www.erudit.org/en/journals/gpq/1979-v33-n1-gpq1495571/1000322ar/.

Mackay, J.R. (1986). Growth of Ibyuk Pingo, Western Arctic Coast, Canada, and some implications for environmental reconstructions. Quaternary Research 26(1), 68–80. https://www.cambridge.org/core/journals/quaternary-research/article/abs/growth-of-ibyuk-pingo-western-arctic-coast-canada-and-some-implications-for-environmental-reconstructions/BD8B61AFAB4048A7C8DC0392C354132B.

Mackay, J.R. (1998). Pingo growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula Area, Western Arctic Coast, Canada: A long-term field study. Géographie Physique et Quaternaire 52(3), 271–323. https://www.erudit.org/en/journals/gpq/1998-v52-n3-gpq153/004847ar/.

Cartes

Vieira, G., Pina, P., Whalen, D., Freitas, P., Pinheiro, D., Fraser, P. et al. (2019). Pingo Canadian Landmark. Ultra High Resolution Aerial Orthomosaic [image]. https://doi.org/10.5281/zenodo.4298906.

Forage en profondeur

Texte

Biskaborn, B.K., Lanckman, J.-P., Lantuit, H., Elger, K., Streletskiy, D.A., Cable, W.L. et al. (2015). The new database of the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). Earth System Science Data 7(2), 245–259. https://essd.copernicus.org/articles/7/245/2015/.

International Permafrost Association (2010). IPA-IPY Thermal State of Permafrost (TSP) Snapshot Borehole Inventory, Version 1 (G02190). National Snow and Ice Data Center. https://nsidc.org/data/g02190/versions/1. Accessed 9 May 2023.

Konstantinov, P., Zheleznyak, M., Basharin, N., Misailov, I. and Andreeva, A. (2020). Establishment of permafrost thermal monitoring sites in East Siberia. Land 9(12), 476. https://www.mdpi.com/2073-445X/9/12/476.

Pika, P., Tanski, G., Ulrich, M., Roy, L.-P., Calmels, F., Lantuit, H. et al. (2022). Landscape-related ground ice variability on the Yukon coastal plain inferred from computed tomography and remote sensing. EGU General Assembly 2022. Vienna, Austria, 23–27 May 2022. Vienna: European Geosciences Union. https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU22/EGU22-10196.html.

Cartes

Pika, P., Tanski, G., Ulrich, M., Roy, L.-P., Calmels, F., Lantuit, H. et al. (in prep.). A multi scale approach assessing excess ground ice volume in permafrost in NW Canada.

Des établissements humains instables

Texte

Bartsch, A., Pointner, G., Nitze, I., Efimova, A., Jakober, D., Ley, S. et al. (2021). Expanding infrastructure and growing anthropogenic impacts along Arctic coasts. Environmental Research Letters 16(11), 115013. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac3176.

Istomin, K., and Habeck, J.O. (2019). Permafrost zone soils and the traditional land use of the aboriginal populations of north-eastern European Russia and western Siberia: Research problem statement. Vestnik arkheologii, antropologii i etnografii 1(44), 108–119. https://iasc.info/about/publications-documents/publications-list/642-permafrost-zone-soils-and-the-traditional-land-use-of-the-aboriginal-populations-of-north-eastern-european-russia-and-western-siberia-research-problem-statement.

Peterson, R.A. and Wendler, K. (2011). Preservation of traditional ice cellars in permafrost: A modeling study of zero-energy solutions for enhancing thermal resilience. Fairbanks, US: University of Alaska. https://sites.google.com/a/alaska.edu/thermally-resilient-permafrost-cellars/.

Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Westermann, S., Lantuit, H. and Heleniak, T. (2021). Population living on permafrost in the Arctic. Population and Environment 43, 22–38. https://link.springer.com/article/10.1007/s11111-020-00370-6.

Cartes

Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Westermann. S., Lantuit, H. and Heleniak, T. (2021). Population living on permafrost in the Arctic. Population and Environment 43, 22–38. https://doi.org/10.1007/s11111-020-00370-6.

États gelés I

Texte

Huntington, H.P., Anisimova, O., Christensen, T., Fenge, T., Hoel, A.H., Jung, T. et al. (2013). Provisioning and cultural services. In Arctic Biodiversity Assessment: Status and Trends in Arctic Biodiversity. Meltofte, H. (ed.). Odder, Denmark: Narayana Press. Chapter 18. 592–627. https://www.caff.is/assessment-series/233-arctic-biodiversity-assessment-2013.

Istomin, K.V. and Habeck, J.O. (2016). Permafrost and indigenous land use in the northern Urals: Komi and Nenets reindeer husbandry. Polar Science, 10(3), 278–287. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1873965216300615.

Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Westermann, S., Lantuit, H. and Heleniak, T. (2021). Population living on permafrost in the Arctic. Population and Environment 43, 22–38. https://link.springer.com/article/10.1007/s11111-020-00370-6.

Streletskiy, D.A., Suter, L.J., Shiklomanov, N.I., Porfiriev, B.N. and Eliseev, D.O. (2019). Assessment of climate change impacts on

buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. Environmental Research Letters 14(2), 025003. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaf5e6.

Cartes

Oak Ridge National Laboratory and East View Cartographic, Inc. (2019). LandScan 2019 Global Population Database. https://searchworks.stanford.edu/view/13736097. Accessed 20 June 2023.

Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-Science Reviews 193, 299–316. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023.

Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Westermann. S., Lantuit, H. and Heleniak, T. (2021). Population living on permafrost in the Arctic. Population and Environment 43, 22–38. https://doi.org/10.1007/s11111-020-00370-6.

États gelés II

Texte

Fritz, M., Vonk, J.E. and Lantuit, H. (2017). Collapsing Arctic coastlines. Nature Climate Change 7, 6–7. https://www.nature.com/articles/nclimate3188.

GRID-Arendal (2020). Coastal and offshore permafrost in a changing Arctic, 13 October. https://storymaps.arcgis.com/stories/c163de04de7849cdb917fee88015dd73. Accessed 9 May 2023.

Irrgang, A.M., Bendixen, M., Farquharson, L.M., Baranskaya, A.V., Erikson, L.H., Gibbs, A.E. et al. (2022). Drivers, dynamics and impacts of changing Arctic coasts. Nature Reviews Earth & Environment 3, 39–54. https://www.nature.com/articles/s43017-021-00232-1.

Kanigan, J.C.N. and Kokelj, S.V. (2010). Review of current research on drilling-mud sumps in permafrost terrain, Mackenzie Delta region, NWT, Canada. GeoCalgary 2010: The 63rd Canadian Geotechnical Conference and 6th Canadian Permafrost Conference. Calgary, Canada, 12–15 September 2010. University of Calgary. 1473–1479. https://pubs.aina.ucalgary.ca/cpc/CPC6-1473.pdf.

Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Westermann, S., Lantuit, H. and Heleniak, T. (2021). Population living on permafrost in the Arctic. Population and Environment 43, 22–38. https://link.springer.com/article/10.1007/s11111-020-00370-6.

Cartes

Oak Ridge National Laboratory and East View Cartographic, Inc. (2019). LandScan 2019 Global Population Database. https://searchworks.stanford.edu/view/13736097. Accessed 20 June 2023.

Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-Science Reviews 193, 299–316. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023.

Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Westermann. S., Lantuit, H. and Heleniak, T. (2021). Population living on permafrost in the Arctic. Population and Environment 43, 22–38. https://doi.org/10.1007/s11111-020-00370-6.

États gelés III

Texte

Christiansen, H.H., Gilbert, G.L., Neumann, U., Demidov, N., Guglielmin, M., Isaksen, K. et al. (2021). Ground ice content, drilling methods and equipment and permafrost dynamics in Svalbard 2016-2019 (PermaSval). In SESS report 2020. Moreno-Ibáñez et al. (eds). Longyearbyen: Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System. Chapter 12. 259-275. https://doi.org/10.5281/zenodo.4294095

Humlum, O., Instanes, A. and Sollid, J.L. (2003). Permafrost in Svalbard: A review of research history, climatic background and engineering challenges. Polar Research 22(2), 191–215. https://polarresearch.net/index.php/polar/article/view/2108.

Ingeman-Nielsen, T. and Foged, N. (2018). Kangerlussuaq Airport: Establishing a borehole database in support of future operational and maintenance decisions. In Proceedings of the conference AIC2018: Transportation Infrastructure Engineering in Cold Regions, 74-75. BYG DTU Rapport No. R-388.

Magnin, F., Etzelmüller, B., Westermann, S., Isaksen, K., Hilger, P. and Hermanns, R.L. (2019). Permafrost distribution in steep rock slopes in Norway: Measurements, statistical modelling and geomorphological processes. Earth Surface Dynamics 7, 1019–1040. https://esurf.copernicus.org/articles/7/1019/2019/.

Meltofte, H. and Thing, H. (eds.) (1996). Zackenberg Ecological Research Operations, 1st Annual Report, 1995. Copenhagen: Danish Polar Center. https://g-e-m.dk/fileadmin/Resources/DMU/GEM/Zackenberg/Nye_Zac_files/ZERO_Annual_Report1995.pdf.

Quaile, I. (2020). Zackenberg revisited – Greenland climate research station under threat from permafrost thaw, 14 July. https://www.rcinet.ca/eye-on-the-arctic/2020/07/14/blog-zackenberg-revisited-greenland-climate-research-station-under-threat-from-permafrost-thaw/. Accessed 9 May 2023.

Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Westermann, S., Lantuit, H. and Heleniak, T. (2021). Population living on permafrost in the Arctic. Population and Environment 43, 22–38. https://link.springer.com/article/10.1007/s11111-020-00370-6.

Cartes

Oak Ridge National Laboratory and East View Cartographic, Inc. (2019). LandScan 2019 Global Population Database. https://searchworks.stanford.edu/view/13736097. Accessed 20 June 2023.

Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-Science Reviews 193, 299–316. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023.

Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Westermann. S., Lantuit, H. and Heleniak, T. (2021). Population living on permafrost in the Arctic. Population and Environment 43, 22–38. https://doi.org/10.1007/s11111-020-00370-6.

L'éveil du géant

Réchauffement en hausse, refroidissement en baisse

Texte

Biskaborn, B.K., Smith, S.L., Noetzli, J., Matthes, H., Vieira, G., Streletskiy, D.A. et al. (2019). Permafrost is warming at a global scale. Nature Communications 10, 264. https://www.nature.com/articles/s41467-018-08240-4.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Chen, Y. et al. (eds.). Cambridge, UK and New York, US: Cambridge University Press. https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/58039/1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf.

Pihl, E., Alfredsson, E., Bengtsson, M., Bowen, K., Cástan Broto, V., Chou, K. et al. (2021). Ten new insights in climate science 2020 – a horizon scan. Global Sustainability 4, e5, 1-18. https://doi.org/10.1017/sus.2021.2

Romanovsky, V., Isaksen, K., Drozdov, D., Anisimov, O., Instanes, A., Leibman, M. et al. (2017). Changing permafrost and its impacts. In Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Symon, C. (ed.). Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme. Chapter 4. 64–102. https://www.amap.no/documents/download/2987/inline.

Smith, S.L., O'Neill, H.B., Isaksen, K., Noetzli, J. and Romanovsky, V.E. (2022). The changing thermal state of permafrost. Nature Reviews Earth & Environment 3, 10–23. https://www.nature.com/articles/s43017-021-00240-1.

Cartes

Biskaborn, B.K., Smith, S.L., Noetzli, J., Matthes, H., Vieira, G., Streletskiy, D.A. et al. (2019). Permafrost is warming at a global scale. Nature Communications 10, 264. https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4.

Romanovsky, V. (2021). Past, recent, and future changes in permafrost in Alaska: Measurements and modeling results. Cryosphere Transformation and Geotechnical Safety in the Arctic. Salekhard, Russia and Online, 8–12 November 2021. Fairbanks, Alaska: Arctic Research Consortium of the United States.

Coup de chaud

Texte

Brown, J., Hinkel, K.M. and Nelson, F.E. (2000). The circumpolar active layer monitoring (calm) program: Research designs and initial results. Polar Geography 24(3), 166–258. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10889370009377698.

Romanovsky, V., Isaksen, K., Drozdov, D., Anisimov, O., Instanes, A., Leibman, M. et al. (2017). Changing permafrost and its impacts. In Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Symon, C. (ed.). Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme. Chapter 4. 64–102. https://www.amap.no/documents/download/2987/inline.

Romanovsky, V.E., Smith, S.L., Isaksen, K., Nyland, K.E., Kholodov, A.L., Shiklomanov, N.I., et al. (2020). Terrestrial Permafrost. In State of the Climate in 2019. Bulletin of the American Meteorological Society 101(8), S265–S269. https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/101/8/2020BAMSStateoftheClimate.xml?tab_body=pdf.

Smith, S.L., O'Neill, H.B., Isaksen, K., Noetzli, J. and Romanovsky, V.E. (2022). The changing thermal state of permafrost. Nature Reviews Earth & Environment 3, 10–23. https://www.nature.com/articles/s43017-021-00240-1.

Strand, S.M., Christiansen, H.H., Johansson, M., Åkerman, J. and Humlum, O. (2020). Active layer thickening and controls on interannual variability in the Nordic Arctic compared to the circum-Arctic. Permafrost and Periglacial Processes 32(1), 47–58. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppp.2088.

Cartes

Obu, J., Westermann, S., Barboux, C., Bartsch, A., Delaloye, R., Grosse, G. et al. (2021). ESA Permafrost Climate Change Initiative (Permafrost_cci): Permafrost Active Layer Thickness for the Northern Hemisphere, v3.0. NERC EDS Centre for Environment Data Analysis. https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/67a3f8c8dc914ef99f7f08ebod997e23. Accessed 20 June 2023. DOI: 10.5285/67a3f8c8dc914ef99f7f08ebod997e23

En voie de disparition

Texte

Chadburn, S.E., Burke, E.J., Cox, P.M., Friedlingstein, P., Hugelius, G. and Westermann, S. (2017). An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming. Nature Climate Change 7, 340–344. https://www.nature.com/articles/nclimate3262.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Chen, Y. et al. (eds.). Cambridge, UK and New York, US: Cambridge University Press. https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/58039/1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf.

Obu, J. (2021). How much of the Earth's surface in underlain by permafrost? Journal of Geophysical Research: Earth Surface 126(5), e2021JF006123. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021JF006123.

Vasiliev, A.A., Drozdov, D.S., Gravis, A.G., Malkova, G.V., Nyland, K.E. and Streletskiy, D.A. (2020). Permafrost degradation in the Western Russian Arctic. Environmental Research Letters 15(4), 045001. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab6f12.

Cartes

Chadburn, S., Burke, E.J., Cox, P., Friedlingstein, P., Hugelius, G. and Westermann, S. (2017). Estimated Future Permafrost Maps Constrained by Observed Relationships, with Link to Model Result Files in NetCDF Format. PANGAEA. https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.873192. Accessed 20 June 2023.

Micro-organismes, macro-effets

Texte

Jansson, J.K. and Hofmockel, K.S. (2019). Soil microbiomes and climate change. Nature Reviews Microbiology 18, 35–46. https://www.nature.com/articles/s41579-019-0265-7.

Schuur, E.A.G., Abbott, B.W., Commane, R., Ernakovich, J., Euskirchen, E., Hugelius, G. et al. (2022). Permafrost and climate change: Carbon cycle feedbacks from the warming Arctic. Annual Review of Environment and Resources 47, 343–371. https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-environ-012220-011847.

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://www.nature.com/articles/nature14338.

Cartes

Scheel, M. (2021). It's getting hot in here: Ancient microbes in thawing permafrost, 22 October.
https://blogs.egu.eu/divisions/cr/2021/10/22/its-getting-hot-in-here-ancient-microbes-in-thawing-permafrost/. Accessed 20 June 2023.

Wagner, D. (2021). Methanosarcina soligelidi – A multi-resistant archaeon from Siberian permafrost. In Microbial Life in the Cryosphere and Its Feedback on Global Change: Life in Extreme Environments vol. 7. Liebner, S. and Ganzert, L. (eds.). Berlin and Boston, United States: De Gruyter. Chapter 5. 113–140. https://doi.org/10.1515/9783110497083-005.

Plus vite, plus profond, plus fort I

Texte

Miner, K.R., Turetsky, M.R., Malina, E., Bartsch, A., Tamminen, J., McGuire, A.D. et al. (2022). Permafrost carbon emissions in a changing Arctic. Nature Reviews Earth & Environment 3, 55–67. https://www.nature.com/articles/s43017-021-00230-3.

Packalen, M.S., Finkelstein, S.A. and McLaughlin, J.W. (2014). Carbon storage and potential methane production in the Hudson Bay Lowlands since mid-Holocene peat initiation. Nature Communications 5, 4078. https://www.nature.com/articles/ncomms5078.

Packalen, M.S., Finkelstein, S.A. and McLaughlin, J.W. (2016). Climate and peat type in relation to spatial variation of the peatland carbon mass in the Hudson Bay Lowlands, Canada. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 121(4), 1104–1117. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015JG002938.

Turetsky, M.R., Abbott, B.W., Jones, M.C., Anthony, K.T., Olefeldt, D., Schuur, E.A.G. et al. (2020). Carbon release through abrupt permafrost thaw. Nature Geoscience 13, 138–143. https://www.nature.com/articles/s41561-019-0526-0.

Cartes

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(23), 6573–6593. https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014.

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. https://doi.org/10.1038/ncomms13043.

Plus vite, plus profond, plus fort II

Texte

Kremenetski, K.V., Velichko, A.A., Borisova, O.K., MacDonald, G.M., Smith, L.C., Frey, K.E. et al. (2003). Peatlands of the Western Siberian lowlands: Current knowledge on zonation, carbon content and Late Quaternary history. Quaternary Science Reviews 22(5–7), 703–723. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0277379102001968.

Schirrmeister, L., Grosse, G., Wetterich, S., Overduin, P.P., Strauss, J., Schuur, E.A.G. et al. (2011). Fossil organic matter characteristics in permafrost deposits of the northeast Siberian Arctic. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 116(G2), G00M02. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011JG001647.

Streletskiy, D.A., Suter, L.J., Shiklomanov, N.I., Porfiriev, B.N. and Eliseev, D.O. (2019). Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian

regions on permafrost. Environmental Research Letters 14, 025003. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaf5e6#erlaaf5e6s2.
Turetsky, M.R., Abbott, B.W., Jones, M.C., Anthony, K.W., Olefeldt, D., Schuur, E.A.G. et al. (2019). Permafrost collapse is accelerating carbon release. Nature 569, 32–34. https://www.nature.com/articles/d41586-019-01313-4.
Vasiliev, A.A., Drozdov, D.S., Gravis, A.G., Malkova, G.V., Nyland K.E. and Streletskiy, D.A. (2020). Permafrost degradation in the Western Russian Arctic. Environmental Research Letters 15(4), 045001. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab6f12.

Cartes

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(23), 6573–6593. https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014.
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. https://doi.org/10.1038/ncomms13043.

Franchir le seuil

Texte

Canadell, J.G., Monteiro, P.M.S., Costa, M.H., Cotrim da Cunha, L., Cox, P.M., Eliseev, A.V. et al. (2021). Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S. et al. (eds.). Cambridge, UK and New York, US: Cambridge University Press. Chapter 5. 673–816. https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/58039/1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf.
Intergovernmental Panel on Climate Change (2019). Technical summary. In The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E. et al. (eds.). Cambridge, UK and New York, US: Cambridge University Press. 39–70. https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/A05E6C9F8638FA7CE1748DE2EB7B491B/9781009157971AR.pdf/The_Ocean_and_Cryosphere_in_a_Changing_Climate.pdf.
Kleinen, T. and Brovkin, V. (2018). Pathway-dependent fate of permafrost region carbon. Environmental Research Letters 13(9), 094001. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aad824.
Turetsky, M.R., Abbott, B.W., Jones, M.C., Anthony, K.W., Olefeldt, D., Schuur, E.A.G. et al. (2020). Carbon release through abrupt permafrost thaw. Nature Geoscience 13, 138–143. https://www.nature.com/articles/s41561-019-0526-0.
United Nations, Framework Convention on Climate Change (2015). Adoption of the Paris Agreement. 12 December. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf.
Wilkenskjeld, S., Miesner, F., Overduin, P.P., Puglini, M. and Brovkin, V. (2022). Strong increase in thawing of subsea permafrost in the 22nd century caused by anthropogenic climate change. The Cryosphere 16(3), 1057–1069. https://tc.copernicus.org/articles/16/1057/2022/.

Cartes

Kleinen, T. and Brovkin, V. (2018). Pathway-dependent fate of permafrost region carbon. Environmental Research Letters 13(9), 094001.https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad824.
Ridolfi, E., Geels, A., Lefebvre, C. and Arndt, S. (unpublished).

Terrains en mouvement

Gel et flore

Texte

Circumpolar Arctic Vegetation Mapping Team (2023). Raster Circumpolar Arctic Vegetation Map, Version 2. Scale 1:7,000,000. Mendeley Data. https://www.geobotany.uaf.edu/cavm/.
Druckenmiller, M. L., Thoman, R. L. and Moon, T. A. (2022). Arctic Report Card 2022: Executive Summary. National Oceanic and Atmospheric Administration. https://doi.org/10.25923/yjx6-r184
Heijmans, M.M.P.D., Magnússon, R.Í., Lara, M.J., Frost, G.V., Myers-Smith, I.H., van Huissteden, J. et al. (2022). Tundra vegetation change and impacts on permafrost. Nature Reviews Earth & Environment 3, 68–84. https://www.nature.com/articles/s43017-021-00233-0.
Raynolds, M.K., Walker, D.A., Balser, A., Bay, C., Campbell, M., Cherosov, M.M. et al. (2019). A raster version of the Circumpolar Arctic Vegetation Map (CAVM). Remote Sensing of Environment 232, 111297. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425719303165.
Scholten, R.C., Jandt, R., Miller, E.A., Rogers, B.M. and Veraverbeke, S. (2021). Overwintering fires in boreal forests. Nature 593, 399–404. https://www.nature.com/articles/s41586-021-03437-y.
Smith, S.L., O'Neill, H.B., Isaksen, K., Noetzli, J. and Romanovsky, V.E. (2022). The changing thermal state of permafrost. Nature Reviews Earth & Environment 3, 10–23. https://www.nature.com/articles/s43017-021-00240-1.
United Nations Environment Programme (2022). Spreading like wildfire: The rising threat of extraordinary landscape fires: A rapid response assessment. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://www.unep.org/resources/report/spreading-wildfire-rising-threat-extraordinary-landscape-fires.

Cartes

Frost, G.V., Macander, M.J., Bhatt, U.S., Berner, L.T., Bjerke, J.W., Epstein, H.E. et al. (2021). Tundra Greenness. In Arctic Report Card 2021, NOAA Technical Report OAR ARC; 21-08. United States: NOAA Institutional Repository. 1–8. https://doi.org/10.25923/8n78-wp73.
Li, J., Holmgren, M. and Xu, C. (2021). Greening vs browning? Surface water cover mediates how tundra and boreal ecosystems respond to climate warming. Environmental Research Letters 16(10), 104004. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac2376.
Olson, D.M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E.D., Burgess, N.D., Powell, G V N., Underwood, E.C. et al. (2001). Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on earth: A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. BioScience 51(11), 933–938. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2.

Le feu sur la glace

Texte

Chapin III, F.S., Mcguire, A.D., Randerson, J., Pielke, R., Baldocchi, D., Hobbie, S.E., et al. (2000). Arctic and boreal ecosystems of western North America as components of the climate system. Global Change Biology 6(S1), 211–223. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-2486.2000.06022.x.
Conard, S.G. and Ponomarev, E. (2020). Fire in the North: The 2020 Siberian fire season, October–December. https://www.iawfonline.org/article/fire-in-the-north-the-2020-siberian-fire-season/. Accessed 10 May 2023.
Food and Agriculture Organization of the United Nations (2020). Peatland mapping and monitoring: Recommendations and technical overview. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/3/CA8200EN/CA8200EN.pdf.
Helbig, M., Waddington, J.M., Alekseychik, P., Amiro, B.D., Aurela, M., Barr, A.G. et al. (2020). Increasing contribution of peatlands to boreal evapotranspiration in a warming climate. Nature Climate Change 10, 555–560. https://www.nature.com/articles/s41558-020-0763-7.pdf.
Hugelius, G., Loisel, J., Chadburn, S., Jackson, R.B., Jones, M., MacDonald, G. et al. (2020). Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw. PNAS 117(34), 20438–20446. https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1916387117.
Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A.,

Connors, S.L., Péan, C., Chen, Y. et al. (eds.). Cambridge, UK and New York, US: Cambridge University Press. https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/58039/1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf.
United Nations Environment Programme (2019). Permafrost peatlands: Losing ground in a warming world. In Frontiers 2018/19: Emerging Issues of Environmental Concern. Nairobi: United Nations Environment Programme. Chapter 3. 38–48. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27542/Frontiers1819_ch3.pdf.
United Nations Environment Programme (2022). Global peatlands assessment: The state of the world's peatlands: Evidence for action toward the conservation, restoration, and sustainable management of peatlands: Main report. Nairobi: United Nations Environment Programme. https://globalpeatlands.org/sites/default/files/2022-12/peatland_assessment.pdf.
Witze, A. (2020). The Arctic is burning like never before – and that's bad news for climate change. Nature 585, 336-337. https://www.nature.com/articles/d41586-020-02568-y. Accessed 10 May 2023.
Zhang, Z., Wang, C., Lv, D., Hay, W.W., Wang, T. and Cao, S. (2020). Precession-scale climate forcing of peatland wildfires during the early middle Jurassic greenhouse period. Global and Planetary Change 184, 103051. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103051

Cartes

Greifswald Mire Centre (2023). The Global Peatland Database. https://www.greifswaldmoor.de/global-peatland-database-en.html. Accessed 20 June 2023.
NASA Earth Observations (2020). Active Fires (1 Month – Terra/MODIS). NASA Earth Observations. https://neo.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MOD14A1_M_FIRE&year=2020. Accessed 20 June 2023.
Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-Science Reviews 193, 299–316. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023.
Overduin, P.P., Schneider von Deimling, T., Miesner, F., Grigoriev, M.N., Ruppel, C., Vasiliev, A. et al. (2019). Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP). Journal of Geophysical Research: Oceans 124(6), 3490–3507. https://doi.org/10.1029/2018JC014675.

État de la matière

Texte

Douglas, T.A., Turetsky, M.R. and Koven, C.D. (2020). Increased rainfall stimulates permafrost thaw across a variety of Interior Alaskan boreal ecosystems. Npj Climate and Atmospheric Science 3, 28. https://www.nature.com/articles/s41612-020-0130-4.
Fritz, M., Wolter, J., Rudaya, N., Palagushkina, O., Nazarova, L., Obu, J. et al. (2016). Holocene ice-wedge polygon development in northern Yukon permafrost peatlands (Canada). Quaternary Science Reviews 147, 279–297. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0277379116300403.
Liljedahl, A., Boike, J., Daanen, R.P., Fedorov, A.N., Frost, G.V., Grosse, G. et al. (2016). Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. Nature Geoscience 9, 312–318. https://www.nature.com/articles/ngeo2674.
O'Neill, H.B. and Burn, C.R. (2017). Impacts of variations in snow cover on permafrost stability, including simulated snow management, Dempster Highway, Peel Plateau, Northwest Territories. Arctic Science 3(2), 150–178. https://cdnsciencepub.com/doi/10.1139/as-2016-0036.
Smith, S.L., O'Neill, H.B., Isaksen, K., Noetzli, J. and Romanovsky, V.E. (2022). The changing thermal state of permafrost. Nature Reviews Earth & Environment 3, 10–23. https://www.nature.com/articles/s43017-021-00240-1.
Speetjens, N.J., Hugelius, G., Gumbricht, T., Lantuit, H., Berghuijs, W.R., Pika, P.A. et al. (2023) The pan-Arctic catchment database (ARCADE). Earth System Science Data 15(2), 541–554. https://essd.copernicus.org/articles/15/541/2023/.
Vonk, J.E., Tank, S.E. and Walvoord, M.A. (2019). Integrating hydrology and biogeochemistry across frozen landscapes. Nature Communications 10, 5377. https://www.nature.com/articles/s41467-019-13361-5.
Vonk, J.E., Speetjens, N.J. and Poste, A.E. (2023). Small watersheds may play a disproportionate role in arctic land-ocean fluxes. Nature Communications 14, 3442. https://www.nature.com/articles/s41467-023-39209-7.
Zhang, S.-M., Mu, C.-C., Li, Z.-L., Dong, W.-W., Wang, X.-Y., Streletskaya, I. et al. (2021). Export of nutrients and suspended solids from major Arctic rivers and their response to permafrost degradation. Advances in Climate Change Research 12(4), 466–474. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674927821000824.
Zheng, L., Overeem, I., Wang, K. and Clow, G. D. (2019). Changing Arctic river dynamics cause localized permafrost thaw. Journal of Geophysical Research: Earth Surface 124(9), 2324–2344. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019JF005060.

Cartes

McCrystall, M.R., Stroeve, J., Serreze, M., Forbes, B.C. and Screen, J.A. (2021). New climate models reveal faster and larger increases in Arctic precipitation than previously projected. Nature Communications 12, 6765. https://doi.org/10.1038/s41467-021-27031-y.
Sathyendranath, S., Brewin, R.J.W., Brockmann, C., Brotas, V., Calton, B., Chuprin, A. et al. (2019). An ocean-colour time series for use in climate studies: The experience of the Ocean-Colour Climate Change Initiative (OC-CCI). Sensors 19(19), 4285. https://doi.org/10.3390/s19194285.
Speetjens, N.J., Hugelius, G., Gumbricht, T., Lantuit, H., Berhuijs, W.R., Pika, P.A. et al. (2023). The pan-Arctic catchment database (ARCADE). Articles 15(2), 541–554. https://doi.org/10.5194/essd-15-541-2023.

Et au milieu coule une rivière

Texte

Beel, C.R., Heslop, J.K., Orwin, J.F., Pope, M.A., Schevers, A.J., Hung, J.K.Y. et al. (2021). Emerging dominance of summer rainfall driving High Arctic terrestrial-aquatic connectivity. Nature Communications 12, 1448. https://doi.org/10.1038/s41467-021-21759-3.
Forbes, D.L. (2019). Arctic deltas and estuaries: A Canadian perspective. In Coasts and Estuaries: The Future. Wolanski, E., Day, J., Elliott, M. and Ramachandran, R. (eds.). Amsterdam, Netherlands, Oxford, UK and Cambridge, US: Elsevier. Chapter 8. 123–147. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814003-1.00008-3.
Fuchs, M., Nitze, I., Strauss, J., Günther, F., Wetterich, S., Kizyakov, A. et al. (2020). Rapid fluvio-thermal erosion of a Yedoma permafrost cliff in the Lena River Delta. Frontiers in Earth Science 8, 336. https://doi.org/10.3389/feart.2020.00336.
Holmes, R.M., McClelland, J.W., Peterson, B.J., Tank, S.E., Bulygina, E., Eglinton, T.I. et al. (2012). Seasonal and Annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas. Estuaries and Coasts 35, 369–382. https://doi.org/10.1007/s12237-011-9386-6.
Juhls, B., Antonova, S., Angelopoulos, M., Bobrov, N., Grigoriev, M., Langer, M. et al. (2021). Serpentine (floating) ice channels and their interaction with riverbed permafrost in the Lena River Delta, Russia. Frontiers in Earth Science 9, 689941. https://doi.org/10.3389/feart.2021.689941.
Kokelj, S.V., Kokoszka, J., van der Sluijs, J., Rudy, A.C.A., Tunnicliffe, J., Shakil, S. et al. (2021). Thaw-driven mass wasting couples slopes with downstream systems, and effects propagate through Arctic drainage networks. The Cryosphere 15(7), 3059–3081. https://doi.org/10.5194/tc-15-3059-2021.
Overeem, I., Nienhuis, J.H. and Piliouras, A. (2022). Ice-dominated Arctic deltas. Nature Reviews Earth & Environment 3, 225–240. https://doi.org/10.1038/s43017-022-00268-x.
Semiletov, I., Pipko, I., Gustafsson, Ö., Anderson, L.G., Sergienko, V., Pugach, S. et al. (2016). Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon. Nature Geoscience 9, 361–365. https://doi.org/10.1038/ngeo2695
Speetjens, N.J., Hugelius, G., Gumbricht, T., Lantuit, H., Berghuijs, W.R., Pika, P.A. et al. (2023) The pan-Arctic catchment database (ARCADE). Earth System Science Data 15(2), 541–554. https://doi.org/10.5194/essd-15-541-2023.
Wagner, A., Lohmann, G. and Prange, M. (2011). Arctic river discharge trends since 7 ka BP. Global and Planetary Change 79(1–2), 48–60. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.07.006.

Cartes

European Union Agency for the Space Programme (2020). Copernicus Data Space Ecosystem: Satellite Imagery for 9 September 2020. https://dataspace.copernicus.eu/. Accessed 20 June 2023.

Aux confins du monde

Texte

Boisson, A. and Allard, M. (2020). Boulder barricades in an emerging hypertidal environment: The case of Ungava Bay, northern Quebec, Canada. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography 102(1), 33–56. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/04353676.2020.1711665.

Boisson, A., Allard, M. and Sarrazin, D. (2020). Permafrost aggradation along the emerging eastern coast of Hudson Bay, Nunavik (northern Quebec, Canada). Permafrost and Perglacial Processes 31(1), 128–140. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppp.2033.

Forbes, D.L. (2019). Arctic deltas and estuaries: A Canadian perspective. In: Coasts and Estuaries: The Future. Wolanski, E., Day, J., Elliott, M. and Ramachandran, R. (eds.). Amsterdam, Netherlands, Oxford, UK and Cambridge, US: Elsevier. Chapter 8. 123–147. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128140031000083.

Forbes, D.L. and Taylor, R.B. (1994). Ice in the shore zone and the geomorphology of cold coasts. Progress in Physical Geography: Earth and Environment 18(1), 59–89. https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/030913339401800104.

Fritz, M., Vonk, J.E. and Lantuit, H. (2017). Collapsing Arctic coastlines. Nature Climate Change 7, 6–7. https://www.nature.com/articles/nclimate3188.

Hansell, R.I.C., Scott, P.A., Staniforth, R. and Svoboda, J. (1983). Permafrost development in the intertidal zone at Churchill, Manitoba: A possible mechanism for accelerated beach uplift. Arctic 36(2), 198–203. https://journalhosting.ucalgary.ca/index.php/arctic/article/view/65315.

Hansom, J.D., Forbes, D.L. and Etienne, S. (2014). The rock coasts of polar and sub-polar regions. In Rock Coast Geomorphology: A Global Synthesis. Kennedy, D. M., Stephenson, W.J. and Naylor, L.A. (eds.). Bath, UK: Geological Society of London. 263–281. https://pubs.geoscienceworld.org/gsl/books/book/1781/chapter-abstract/107679778/The-rock-coasts-of-polar-and-sub-polar-regions.

Hatcher, S.V., Forbes, D.L. and Manson, G.K. (2021). Boulder-strewn flats in a high-latitude macrotidal embayment, Baffin Island: geomorphology, formation, and future stability. Canadian Journal of Earth Sciences 59(11), 866–883. https://doi.org/10.1139/cjes-2021-0019

Irrgang, A.M., Bendixen, M., Farquharson, L.M., Baranskaya, A.V., Erikson, L.H., Gibbs, A.E. et al. (2022). Drivers, dynamics and impacts of changing Arctic coasts. Nature Reviews Earth & Environment 3, 39–54. https://www.nature.com/articles/s43017-021-00232-1.

Jones, B.M, Arp, C.D., Jorgenson, M.T., HInkel, K.M., Schmutz, J.A. and Flint, P.L. (2009). Increase in the rate and uniformity of coastline erosion in Arctic Alaska. Geophysical Research Letters 36, L03503. https://doi.org/10.1029/2008GL036205

Lantuit, H., Overduin, P.P., Couture, N., Wetterich, S. Aré, F., Atkinson, D. et al. (2012). The Arctic Coastal Dynamics Database: A new classification scheme and statistics on Arctic permafrost coastlines. Estuaries and Coasts 35, 383–400. https://link.springer.com/article/10.1007/s12237-010-9362-6.

National Snow and Ice Data Center (2021). Arctic sea ice at highest minimum since 2014, 22 September. https://nsidc.org/arcticseaicenews/2021/09/arctic-sea-ice-at-highest-minimum-since-2014/. Accessed 10 May 2023.

Cartes

Lantuit, H., Overduin, P.P., Couture, N., Wetterich, S., Aré, F., Atkinson, D. et al. (2012). The Arctic Coastal Dynamics database: A new classification scheme and statistics on Arctic permafrost coastlines. Estuaries and Coasts 35, 383–400. https://doi.org/10.1007/s12237-010-9362-6.

Obu, J., Westermann, S., Barboux, C., Bartsch, A., Delaloye, R., Grosse, G. et al. (2021). ESA Permafrost Climate Change Initiative (Permafrost_cci): Permafrost Active Layer Thickness for the Northern Hemisphere, v3.0. NERC EDS Centre for Environment Data Analysis. https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/67a3f8c8dc914ef99f7f08ebod997e23. Accessed 20 June 2023. DOI: 10.5285/67a3f8c8dc914ef99f7f08ebod997e23

Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Westermann. S., Lantuit, H. and Heleniak, T. (2021). Population living on permafrost in the Arctic. Population and Environment 43, 22–38. https://doi.org/10.1007/s11111-020-00370-6.

L'usure du temps

Texte

Aré, F.E. (1988). Thermal abrasion of sea coasts (part I). Polar Geography and Geology 12(1), 1–86. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10889378809377343.

Atkinson, D.A. (2005). Observed storminess patterns and trends in the circum-Arctic coastal regime. Geo-Marine Letters, 25, 98-109. https://doi.org/10.1007/s00367-004-0191-0

Grosse, G., Nitze, I. Sachs, T., Gessner, M. (2019). Master tracks in different resolutions during POLAR 6 campaign P6_219_ThawTrend_Air_2019. Alfred Wegener Institute - Research Unit Potsdam, PANGAEA, https://doi.org/10.1594/PANGAEA.905792. Accessed 04 April 2023.

Fritz, M., Vonk, J.E. and Lantuit, H. (2017). Collapsing Arctic coastlines. Nature Climate Change 7, 6–7. https://www.nature.com/articles/nclimate3188.

Günther, F., Overduin, P.P., Sandakov, A.V., Grosse, G. and Grigoriev, M.N. (2013). Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region. Biogeosciences 10(6), 4297–4318. https://bg.copernicus.org/articles/10/4297/2013/.

Irrgang, A.M., Bendixen, M., Farquharson, L.M., Baranskaya, A.V., Erikson, L.H., Gibbs, A.E. et al. (2022). Drivers, dynamics and impacts of changing Arctic coasts. Nature Reviews Earth & Environment 3, 39–54. https://www.nature.com/articles/s43017-021-00232-1.

Jones, B.M., Farquharson, L.M., Baughman, C.A., Buzard, R.M., Arp, C.D., Grosse, G. et al. (2018). A decade of remotely sensed observations highlight complex processes linked to coastal permafrost bluff erosion in the Arctic. Environmental Research Letters 13(11), 115001. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aae471/meta.

Tanski, G., Bröder, L., Wagner, D., Knoblauch, C., Lantuit, H., Beer, C. et al. (2021). Permafrost carbon and CO2 pathways differ at contrasting coastal erosion sites in the Canadian Arctic. Frontiers in Earth Science 9, 630493. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2021.630493/full.

Tanski, G., Wagner, D., Knoblauch, C., Fritz, M., Sachs, T. and Lantuit, H. (2019). Rapid CO2 release from eroding permafrost in seawater. Geophysical Research Letters 46(20), 11244–11252. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019GL084303.

Terhaar, J., Lauerwald, R., Regnier, P., Gruber, N. and Bopp, L. (2021). Around one third of current Arctic Ocean primary production sustained by rivers and coastal erosion. Nature Communications 12, 169. https://www.nature.com/articles/s41467-020-20470-z .

Wegner, C., Bennett, K. E., de Vernal, A., Forwick, M., Fritz, M., Heikkilä, M. et al. (2015). Variability in transport of terrigenous material on the shelves and the deep Arctic Ocean during the Holocene. Polar Research 34, 1. https://polarresearch.net/index.php/polar/article/view/3254.

Cartes

Fritz, M., Vonk, J.E. and Lantuit, H. (2017). Collapsing Arctic coastlines. Nature Climate Change 7, 6–7. https://doi.org/10.1038/nclimate3188.

Grosse, G., Nitze, I., Sachs, T. and Gessner, M. (2019). Master Tracks in Different Resolutions During POLAR 6 Campaign P6_219_ThawTrend_Air_2019. Alfred Wegener Institute – Research Unit Potsdam, PANGAEA. https://doi.org/10.1594/PANGAEA.905792. Accessed 20 June 2023.

Irrgang, A.M., Bendixen, M., Farquharson, L.M., Baranskaya, A.V., Erikson, L.H., Gibbs, A.E. et al. (2022). Drivers, dynamics and impacts of changing Arctic coasts. Nature Reviews Earth & Environment 3, 39–54. https://doi.org/10.1038/s43017-021-00232-1.

Ronger le paysage

Texte

Bernhard, P., Zwieback, S. and Hajnsek, I. (2022). Accelerated mobilization of organic carbon from retrogressive thaw slumps on the northern Taymyr Peninsula. The Cryosphere 16(7), 2819–2835. https://tc.copernicus.org/articles/16/2819/2022/.

Costard, F., Dupeyrat, L., Séjourné, A., Bouchard, F., Fedorov, A. and Saint-Bézar, B. (2020). Retrogressive thaw slumps on ice-rich permafrost under degradation: Results from a large-scale laboratory simulation. Geophysical Research Letters 48(1), e2020GL091070. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL091070.

Turetsky, M.R., Abbott, B.W., Jones, M.C., Anthony, K.W., Olefeldt, D., Schuur E.A.G. et al. (2020). Carbon release through abrupt permafrost thaw. Nature Geoscience 13, 138–143. https://www.nature.com/articles/s41561-019-0526-0.

Cartes

Vieira, G. and Pina, P. (Unpublished). Qikiqtaryuk Slump D ultra-high resolution aerial orthomosaic, July 2018. Centre for Geographical Studies of the Institute of Geography and Spatial Planning, University of Lisbon and National Resources Canada.

Perdre du terrain

Texte

Fritz, M., Vonk, J.E. and Lantuit, H. (2017). Collapsing Arctic coastlines. Nature Climate Change 7, 6–7. https://www.nature.com/articles/nclimate3188.

Lantuit, H., Overduin, P.P., Couture, N., Wetterich, S., Aré, F., Atkinson, D. et al. (2011). The Arctic Coastal Dynamics Database: A new classification scheme and statistics on Arctic permafrost coastlines. Estuaries and Coasts 35, 383–400. https://link.springer.com/article/10.1007/s12237-010-9362-6 .

Nielsen, D.M., Pieper, P., Barkhordarian, A., Overduin, P., Ilyina, T., Brovkin, V. et al. (2022). Increase in Arctic coastal erosion and its sensitivity to warming in the twenty-first century. Nature Climate Change 12, 263–270. https://www.nature.com/articles/s41558-022-01281-0.

Tanski, G., Bröder, L., Wagner, D., Knoblauch, C., Lantuit, H., Beer, C. et al. (2021). Permafrost carbon and CO2 pathways differ at contrasting coastal erosion sites in the Canadian Arctic. Frontiers in Earth Science 9, 207. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2021.630493/full.

Terhaar, J., Lauerwald, R., Regnier, P., Gruber, N. and Bopp, L. (2021). Around one third of current Arctic Ocean primary production sustained by rivers and coastal erosion. Nature Communications 12, 169. https://www.nature.com/articles/s41467-020-20470-z.

Cartes

Lantuit, H., Overduin, P.P., Couture, N., Wetterich, S., Aré, F., Atkinson, D. et al. (2012). The Arctic Coastal Dynamics database: A new classification scheme and statistics on Arctic permafrost coastlines. Estuaries and Coasts 35, 383–400. https://doi.org/10.1007/s12237-010-9362-6.

Nielsen, D.M., Pieper, P., Barkhordarian, A., Overduin, P., Ilyina, T., Brovkin, V. et al. (2022). Increase in Arctic coastal erosion and its sensitivity to warming in the twenty-first century. Nature Climate Change 12, 263–270. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01281-0.

Obu, J., Westermann, S., Barboux, C., Bartsch, A., Delaloye, R., Grosse, G. et al. (2021). ESA Permafrost Climate Change Initiative (Permafrost_cci): Permafrost Active Layer Thickness for the Northern Hemisphere, v3.0. NERC EDS Centre for Environment Data Analysis. https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/67a3f8c8dc914ef99f7f08ebod997e23. Accessed 20 June 2023. DOI: 10.5285/67a3f8c8dc914ef99f7f08ebod997e23

Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Westermann. S., Lantuit, H. and Heleniak, T. (2021). Population living on permafrost in the Arctic. Population and Environment 43, 22–38. https://doi.org/10.1007/s11111-020-00370-6.

Sous les vagues

Texte

Angelopoulos, M., Overduin, P.P., Miesner, F., Grigoriev, M.N. and Vasiliev, A.A. (2020). Recent advances in the study of Arctic submarine permafrost. Permafrost and Periglacial Processes 31(3), 442–453. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ppp.2061.

GRID-Arendal (2020). Coastal and offshore permafrost in a changing Arctic, 13 October. https://storymaps.arcgis.com/stories/c163de04de7849cdb917fee88015dd73. Accessed 9 May 2023.

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(23), 6573–6593. https://bg.copernicus.org/articles/11/6573/2014/.

Miesner, F., Overduin, P.P., Grosse, G., Strauss, J., Langer, M., Westermann, S. et al. (2023). Subsea permafrost organic carbon stocks are large and of dominantly low reactivity. Scientific Reports, 13, 9425. https://doi.org/10.1038/s41598-023-36471-z

Overduin, P.P., von Deimling, T.S., Miesner, F., Grigoriev, M.N., Ruppel, C., Vasiliev, A. et al. (2019). Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP). Journal of Geophysical Research: Oceans 124(6), 3490–3507. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018JC014675.

Paull, C.K., Dallimore, S.R., Caress, D.W., Gwiazda, R., Melling, H., Riedel, M. et al. (2015). Active mud volcanoes on the continental slope of the Canadian Beaufort Sea. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 16(9), 3160–3181. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015GC005928.

Ruppel, C. (2015). Permafrost-associated gas hydrate: is it really approximately 1% of the global system? Journal of Chemical & Engineering Data 60(2), 429–436. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/je500770m.

Schuur, E.A.G., Abbott, B.W., Commane, R., Ernakovich, J., Euskirchen, E., Hugelius, G. et al. (2022). Permafrost and climate change: Carbon cycle feedbacks from the warming Arctic. Annual Review of Environment and Resources 47, 343–371. https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-environ-012220-011847.

Wild, B., Shakhova, N., Dudarev, O., Ruban, A., Kosmach, D., Tumskoy, V. et al. (2022). Organic matter composition and greenhouse gas production of thawing subsea permafrost in the Laptev Sea. Nature Communications 13, 5057. https://www.nature.com/articles/s41467-022-32696-0.

Cartes

Majorowicz, J.A. and Hannigan, P.K. (2000). Stability zone of natural gas hydrates in a permafrost-bearing region of the Beaufort—Mackenzie Basin: Study of a feasible energy source1 (Geological Survey of Canada Contribution No.1999275). Natural Resources Research 9, 3–26. https://doi.org/10.1023/A:1010105628952.

Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-Science Reviews 193, 299–316. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023.

Overduin, P.P., Schneider von Deimling, T., Miesner, F., Grigoriev, M.N., Ruppel, C., Vasiliev, A. et al. (2019). Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP). Journal of Geophysical Research: Oceans 124(6), 3490–3507. https://doi.org/10.1029/2018JC014675.

Paull, C.K., Dallimore, S.R., Jin, Y.K., Caress, D.W., Gwiazda, R., Anderson, K. et al. (2022). Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost. PNAS 119(12), e2119105119. https://doi.org/10.1073/pnas.2119105119.

Frissons arctiques

Sentir la chaleur

Texte

de Grandpré, I., Fortier, D. and Stephani, E. (2012). Degradation of permafrost beneath a road embankment enhanced by heat advected in groundwater. Canadian Journal of Earth Sciences 49(8), 953–962. https://cdnsciencepub.com/doi/10.1139/e2012-018.

Hjort, J., Streletskiy, D., Doré, G., Wu, Q., Bjella, K. and Luoto, M. (2022). Impacts of permafrost degradation on infrastructure. Nature Reviews Earth & Environment 3, 24–38. https://www.nature.com/articles/s43017-021-00247-8.

Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J., Westermann, S., Romanovsky, V.E., Nelson, F.E. et al. (2018). Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. Nature Communications 9, 5147. https://www.nature.com/articles/s41467-018-07557-4.

Streletskiy, D.A., Shiklomanov, N.I. and Nelson, F.E. (2012). Permafrost, infrastructure, and climate change: A GIS-based landscape approach to geotechnical modeling. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 44(3), 368–380. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1657/1938-4246-44.3.368.

Streletskiy, D.A., Suter, L.J., Shiklomanov, N.I., Porfiriev, B.N. and Eliseev, D.O. (2019). Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. Environmental Research Letters 14(2), 025003. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaf5e6

Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Westermann, S., Lantuit, H. and Heleniak, T. (2021). Population living on permafrost in the Arctic. Population and Environment 43, 22–38. https://link.springer.com/article/10.1007/s11111-020-00370-6.

Shur, Y. and Goering, D.J. (2009). Climate change and foundations of buildings in permafrost regions. In Permafrost Soils. Margesin, R. (ed.). Soil Biology 16, 251–260. Berlin and Heidelberg: Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-69371-0_17.

Cartes

Obu, J., Westermann, S., Barboux, C., Bartsch, A., Delaloye, R., Grosse, G. et al. (2021). ESA Permafrost Climate Change Initiative (Permafrost_cci): Permafrost Active Layer Thickness for the Northern Hemisphere, v3.0. NERC EDS Centre for Environment Data Analysis. https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/67a3f8c8dc914ef99f7f08ebod997e23. Accessed 20 June 2023. DOI: 10.5285/67a3f8c8dc914ef99f7f08ebod997e23

Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Westermann. S., Lantuit, H. and Heleniak, T. (2021). Population living on permafrost in the Arctic. Population and Environment 43, 22–38. https://doi.org/10.1007/s11111-020-00370-6.

Une activité à risque I

Texte

Allard, M., Lemay, M., Barrette, C., L'Hérault, E. and Sarrazin, D. (2012). Permafrost and climate change in Nunavik and Nunatsiavut: Importance for municipal and transportation infrastructures. In Nunavik and Nunatsiavut: From Science to Policy – An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of Climate Change and Modernization. Allard, M. and Lemay, M. (eds.). Quebéc, Canada: ArcticNet Incorporated. Chapter 6. 171–197. https://www.researchgate.net/publication/264454915_Chapter_6_Permafrost_and_climate_change_in_Nunavik_and_Nunatsiavut_Importance_for_municipal_and_transportation_infrastructures. Accessed 30 June 2023.

De Guzman, E.M.B., Alfaro, M.C., Doré, G., Arenson, L.U. and Piamsalee, A. (2021). Performance of highway embankments in the Arctic constructed under winter conditions. Canadian Geotechnical Journal 58(5), 722–736. https://cdnsciencepub.com/doi/pdf/10.1139/cgj-2019-0121.

Calmels, F., Roy, L.-P., Grandmont, K. and Pugh R. (2018). Summary of Climate- and Geohazard-related Vulnerabilities for the Dempster Highway Corridor. Whitehorse, Yukon: Yukon University Research Centre. https://yukonu.arcabc.ca/islandora/object/yukonu%3A28/datastream/PDF/view.

Calmels, F., Roy, L.-P., Laurent, C., Pelletier, M., Kinnear, L., Benkert, B. et al. (2015). Vulnerability of the North Alaska Highway to Permafrost Thaw: A Field Guide and Data Synthesis. Halladay, P. (ed). Whitehorse, Yukon: Yukon University Research Centre. https://www.yukonu.ca/sites/default/files/inline-files/permafrost_report.pdf.

Hivon, E.G. and Sego, D.C. (1993). Distribution of saline permafrost in the Northwest Territories, Canada. Canadian Geotechnical Journal 30(3), 506–514. https://cdnsciencepub.com/doi/10.1139/t93-043.

Hjort, J., Streletskiy, D., Doré, G., Wu, Q., Bjella, K. and Luoto, M. (2022). Impacts of permafrost degradation on infrastructure. Nature Reviews Earth & Environment 3, 24–38. https://www.nature.com/articles/s43017-021-00247-8.

Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J., Westermann, S., Romanovsky, V.E., Nelson, F.E. et al. (2018). Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. Nature Communications 9, 5147. https://www.nature.com/articles/s41467-018-07557-4.

Ingeman-Nielsen, T., Kandiliotis, P., Lola, M., Foged, N. and Stenseng, L. (2018). Kangerlussuaq Airport Deformations and construction failures in Arctic Permafrost areas. ARTEC International Conference AIC 2018: Transportation Infrastructure Engineering in Cold Regions. Sisimut, Greenland, 1-3 May 2018. 96–97. https://orbit.dtu.dk/en/publications/kangerlussuaq-airport-deformations-and-construction-failures-in-a.

Jungsberg, L., Herslund, L.B., Nilsson, K., Wang, S., Tomaškovičová, S., Madsen, K. et al. (2021). Adaptive capacity to manage permafrost degradation in Northwest Greenland. Polar Geography 45(1), 58–76. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1088937X.2021.1995067

Lamoureux, S., Forbes, D.L., Bell, T., Manson, G.K. et al. (2015). The impact of climate change on infrastructure in the western and central Canadian Arctic. In: From Science to Policy in the Western and Central Canadian Arctic: an Integrated Regional Impact Study (IRIS) of Climate Change and Modernization. Stern, G. and Gaden, A., (eds). Québec, Canada: ArcticNet Incorporated. Chapter 7. 300-341. https://arcticnet.ulaval.ca/wp-content/uploads/2022/06/IRIS_FromScience_ArcticNet_lr_.pdf. Accessed 24 February 2023.

Lemay, M., Allard, M., Bell, T. et al. (2018). Living on permafrost: background and case studies for adapting community infrastructure in a changing climate. In: From Science to Policy in the Eastern Canadian Arctic: an Integrated Regional Impact Study (IRIS) of Climate Change and Modernization. Bell, T. and Brown, T., (eds). Québec, Canada: ArcticNet, Incorporated. Chapter 15. 210-249, https://arcticnet.ulaval.ca/wp-content/uploads/2022/06/29170_IRIS_East_full-report_web_compressed.pdf. Accessed 24 February 2023.

Ma, D., Motagh, M., Liu, G., Zhang, R., Wang, X., Zhang, B. et al. (2022). Thaw settlement monitoring and active layer thickness retrieval using time series COSMO-SkyMed imagery in Iqaluit Airport. Remote Sensing 14(9), 2156. https://www.mdpi.com/2072-4292/14/9/2156.

Melvin, A.M., Larsen, P., Boehlert, B., Neumann, J.E., Chinowsky, P., Espinet, X. et al. (2016). Climate change damages to Alaska public infrastructure and the economics of proactive adaptation. PNAS 114(2), E122–E131. https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.1611056113.

Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Westermann, S., Lantuit, H. and Heleniak, T. (2021). Population living on permafrost in the Arctic. Population and Environment 43, 22–38. https://doi.org/10.1007/s11111-020-00370-6.

Romanovsky, V. (2011). High-resolution permafrost modeling and planning implications for Greenland and Alaska, 31 May. https://www.arcus.org/witness-the-arctic/2011/2/article/1651. Accessed 7 June 2023.

Streletskiy, D.A., Clemens, S., Lanckman, J.P. and Shiklomanov, N.I. (2023). The costs of Arctic infrastructure damages due to permafrost degradation. Environmental Research Letters 18, 014006. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/acab18/meta

Suter, L., Streletskiy, D. and Shiklomanov, N. (2019). Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic. Polar Geography 42(4), 267–286. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1088937X.2019.1686082.

Cartes

Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J., Westermann, S., Romanovsky, V.E., Nelson, F.E. et al. (2018). Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. Nature Communications 9, 5147. https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4.

Karjalainen, O., Aalto, J., Luoto, M., Westermann, S., Romanovsky, V.E., Nelson, F.E. et al. (2019). Circumpolar permafrost maps and geohazard indices for near-future infrastructure risk assessments. Scientific Data 6, 190037. https://doi.org/10.1038/sdata.2019.37.

Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Westermann. S., Lantuit, H. and Heleniak, T. (2021). Population living on permafrost in the Arctic. Population and Environment 43, 22–38. https://doi.org/10.1007/s11111-020-00370-6.

Une activité à risque II

Texte

Hjort, J., Streletskiy, D., Doré, G., Wu, Q., Bjella, K. and Luoto, M. (2022). Impacts of permafrost degradation on infrastructure. Nature Reviews Earth & Environment 3, 24–38. https://www.nature.com/articles/s43017-021-00247-8.

Kotov, P.I. and Khilimonyuk, V.Z. (2021). Building stability on permafrost in Vorkuta, Russia. Geography, Environment, Sustainability 14(4), 67–74. https://ges.rgo.ru/jour/article/view/2069.

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(1), 125–142. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1111/gere.12214.

Shur, Y. and Goering, D.J. (2009). Climate change and foundations of buildings in permafrost regions. In Permafrost Soils. Margesin, R. (ed.). Soil Biology 16, 251–260. Berlin and Heidelberg: Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-69371-0_17.

Cartes

Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J., Westermann, S., Romanovsky, V.E., Nelson, F.E. et al. (2018). Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. Nature Communications 9, 5147. https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4.

Karjalainen, O., Aalto, J., Luoto, M., Westermann, S., Romanovsky, V.E., Nelson, F.E. et al. (2019). Circumpolar permafrost maps and geohazard indices for near-future infrastructure risk assessments. Scientific Data 6, 190037. https://doi.org/10.1038/sdata.2019.37.

Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Westermann. S., Lantuit, H. and Heleniak, T. (2021). Population living on permafrost in the Arctic. Population and Environment 43, 22–38. https://doi.org/10.1007/s11111-020-00370-6.

Terre instable I

Texte

Barnhart, K.R., Overeem, I. and Anderson, R.S. (2014). The effect of changing sea ice on the physical vulnerability of Arctic coasts. Cryosphere 8(5), 1777–1799. https://tc.copernicus.org/articles/8/1777/2014/.

Bartsch, A., Pointner, G., Nitze, I., Efimova, A., Jakober, D., Ley, S. et al. (2021). Expanding infrastructure and growing anthropogenic impacts along Arctic coasts. Environmental Research Letters 16, 115013. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac3176/pdf.

Chuvilin, E.M., Yakushev, V.S. and. Perlova, E.V. (2000). Gas and possible gas hydrates in the permafrost of Bovanenkovo gas field, Yamal Peninsula, West Siberia. Polarforschung 68, 215–219. https://core.ac.uk/download/pdf/11771406.pdf.

Chuvilin, E., Tipenko, G., Bukhanov, B., Istomin, V. and Pissarenko, D. (2022). Simulating thermal interaction of gas production wells with relict gas hydrate-bearing permafrost. Geosciences 12(3), 115. https://www.mdpi.com/2076-3263/12/3/115.

Fritz, M., Vonk, J.E. and Lantuit, H. (2017). Collapsing Arctic coastlines. Nature Climate Change 7, 6–7. https://www.nature.com/articles/nclimate3188.

Leibman, M., Khomutov, A. and Kizyakov, A. (2014). Cryogenic landslides in the west-Siberian plain of Russia: Classification, mechanisms, and landforms. In Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change. Shan, W., Guo, Y., Wang, F., Marui, H., Strom, A. (eds). Cham, Switzerland: Springer. 143–162. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00867-7_11.

Tsentr, A. (2020). TEK Rossii—2019 [Russia's Fuel and Energy Complex 2019]. Analytical Center for the Government of the Russian Federation.

Vasiliev, A. (2021). An Arctic success story: Yamal Nenets Autonomous Region, 9 March. https://www.arcticcircle.org/journal/an-arctic-success-story-yamal-nenets-autonomous-region. Accessed 7 June 2023.

Yakushev, V.S. (2020). Natural gas liberations around production wells at Russian Arctic gas fields. Geosciences 10(5), 184. https://www.mdpi.com/2076-3263/10/5/184.

Cartes

Bartsch, A., Pointner, G., Nitze, I., Efimova, A., Jakober, D., Ley, S. et al. (2021). Expanding infrastructure and growing anthropogenic impacts along Arctic coasts. Environmental Research Letters 16(11), 115013. https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac3176.

Obu, J., Westermann, S., Barboux, C., Bartsch, A., Delaloye, R., Grosse, G. et al. (2021). ESA Permafrost Climate Change Initiative (Permafrost_cci): Permafrost Active Layer Thickness for the Northern Hemisphere, v3.0. NERC EDS Centre for Environment Data Analysis. https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/67a3f8c8dc914ef99f7f08ebod997e23. Accessed 20 June 2023. DOI: 10.5285/67a3f8c8dc914ef99f7f08ebod997e23.

Protection of the Arctic Marine Environment (2021). Arctic Ship Traffic Data for 2 March 2021. Protection of the Arctic Marine Environment. https://pame.is/index.php/projects/arctic-marine-shipping/astd. Accessed 20 June 2023.

Terre instable II

Texte

Bouchard, C. (2020). Arctic Airports and Aerodromes As Critical Infrastructure. Peterborough: North American Arctic Defence and Security Network. https://www.naadsn.ca/wp-content/uploads/2020/11/Airports_CI_2020_11_05.pdf.

Tanguy, R., Whalen, D., Prates, G., Pina, P., Freitas, P., Bergstedt, H., and Vieira, G. (2023). Permafrost degradation in the ice-wedge tundra terrace of Paulatuk Peninsula (Darnley Bay, Canada). Geomorphology 435, 108754. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108754

Tanguy, R., Whalen, D., Prates, G., and Vieira, G. (2023). Shoreline change rates and land to sea sediment and soil organic carbon transfer in eastern Parry Peninsula from 1965 to 2020 (Amundsen Gulf, Canada). Arctic Science 9(3), 506-525. https://doi.org/10.1139/AS-2022-0028

Cartes

Vieira, G., Whalen, D., Pina, P., Freitas, P. and Pinheiro, D. (Unpublished). Paulatuk ultra-high resolution aerial orthomosaic, July 2019. Centre for Geographical Studies of the Institute of Geography and Spatial Planning, University of Lisbon and National Resources Canada.

Terre instable III

Texte

Brown, J. (1969). Ionic Concentration Gradients in Permafrost, Barrow, Alaska. Hanover, New Hampshire, US: United States Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory. https://erdc-library.erdc.dren.mil/jspui/bitstream/11681/5827/1/CRREL-Research-Report-272.pdf.

D'Oro, R. (2019). Failing ice cellars signal changes in Alaska whaling towns, 25 November. https://apnews.com/article/us-news-ap-top-news-whales-climate-change-weekend-reads-ea84d035f9ff46d099ef63fc21b95a2f. Accessed 7 June 2023.

Frost, K. (2021). Climate change is melting Arctic ice cellars, 1 June. https://civileats.com/2021/06/01/climate-change-is-melting-arctic-ice-cellars/. Accessed 7 June 2023.

Maslakov, A.A., Nyland, K.E., Komova, N.N., Yurov, F.D., Yoshikawa, K. and Kraev, G.N. (2020). Community ice cellars In Eastern Chukotka: Climatic and anthropogenic influences on structural stability. Geography, Environment, Sustainability 13(3), 49–56. https://ges.rgo.ru/jour/article/view/1192.

Nyland, K.E., Klene, A.E., Brown, J., Shiklomanov, N.I., Nelson, F.E., Streletskiy, D.A. et al. (2017). Traditional Iñupiat ice cellars (SIĠlUAQ) in Barrow, Alaska: Characteristics, temperature monitoring, and distribution. Geographical Review 107(1), 143–158. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1111/j.1931-0846.2016.12204.x.

Ray, P. H., Murdoch, J., Riley, C. V., Gray, A., Dall, W. H. and Schott, C. A. (1885). Report of the International Polar Expedition to Point Barrow, Alaska. Washington, D.C.: United States Government Printing Office. https://www.biodiversitylibrary.org/item/76077#page/9/mode/1up.

Cartes

Yoshikawa, K., Maslakov, A.A., Kraev, G., Ikuta, H., Romanovsky, V.E., George, J.C. et al. (2022). Food storage in permafrost and

seasonally frozen ground in Chukotka and Alaska communities. Archives 75(2), 149–290. https://doi.org/10.14430/arctic75259.

Terre instable IV

Texte

Avannaata Kommunia (2021). Urban Development – Ilulissat Nord: Nordre Næs and Kangerluarsuk / Brede Bay Sites. Ilulissat, Greenland. https://www.avannaata.gl/-/media/avannaata/filer/nyheder/2022/strukturplan pdf?la=da&hash=DFD68E806DF3399F83B5B4BDFDC6099.

Finnsson, P.T. (2018). The threat of permafrost thaw is looming in the Arctic, 15 October. https://nordregio.org/nordregio-magazine/issues/arctic-changes-and-challenges/the-threat-of-permafrost-thaw-is-looming-in-the-arctic/. Accessed 8 June 2023.

Ingemann-Nielsen, personal communication

Ingeman-Nielsen, T. (2018). Oedometer tests on frozen cores from Ilulissat, Greenland. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (2004). Ilulissat Icefjord. https://whc.unesco.org/en/list/1149/. Accessed 8 June 2023.

Cartes

ASIAQ Greenland Survey (2021). The technical base map. Scale: 1: 2,750 and 1: 5,000. ASIAQ Greenland Survey. https://www.asiaq-greenlandsurvey.gl/kortlaegning-geografisk-information/the-technical-base-map/. Accessed 20 June 2023.

Porter, C., Morin, P., Howat, I., Noh, M.-J., Bates, B., Peterman, K. et al. (2018). ArcticDEM, Version 3. Harvard Dataverse. https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH. Accessed 20 June 2023.

Scheer, J., Caduff, R., How, P., Marcer, M., Strozzi, T., Bartsch, A. et al. (2023). Thaw-season InSAR surface displacements and frost susceptibility mapping to support community-scale planning in Ilulissat, West-Greenland. Preprints.org 2023051683. https://doi.org/10.20944/preprints202305.1683.v1.

Isolement pernicieux

Texte

Brubaker, M., Berner, J., Chavan, R. and Warren, J. (2011). Climate change and health effects in Northwest Alaska. Global Health Action 4(1), 8445. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3402/gha.v4i0.8445.

Cunsolo Willox, A., Harper, S.L., Ford, J.D., Edge, V.L., Landman, K., Houle, K. et al. (2013). Climate change and mental health: an exploratory case study from Rigolet, Nunatsiavut, Canada. Climatic Change 121, 255–270. https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-013-0875-4.

Healey, G.K. (2017). What if our health care systems embodied the values of our communities? A reflection from Nunavut, 20 June. https://www.thearcticinstitute.org/health-care-systems-values-communities-nunavut/. Accessed 8 June 2023.

Ruscio, B.A., Brubaker, M., Glasser, J., Hueston, W. and Hennessy, T.W. (2015). One Health – A strategy for resilience in a changing Arctic. International Journal of Circumpolar Health 74(1), 27913. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3402/ijch.v74.27913.

Timlin, U., Ingimundarson, J.H., Jungsberg, L., Kauppila, S., Larsen, J.N., Nordström, T. et al. (2021). Living conditions and mental wellness in a changing climate and environment: Focus on community voices and perceived environmental and adaptation factors in Greenland. Heliyon 7(4), E06862. https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(21)00965-8.

Timlin, U., Kauppila, S., Jungsberg, L., Nordström, T., Schmidt-Pedersen, K., Kyngäs, H. et al. (2021). Perception of health challenges, self-rated health and feeling of empowerment in a changing climate and environment with permafrost thawing. Sci 3(2), 28. https://www.mdpi.com/2413-4155/3/2/28.

Timlin, U., Meyer, A., Nordström, T. and Rautio, A. (2022). Permafrost thaw challenges and life in Svalbard. Current Research in Environmental Sustainability 4, 100122. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666049021001006.

Timlin, U., Ramage, J., Gartler, S., Nordström, T. and Rautio, A. (2022). Self-rated health, life balance and feeling of empowerment when facing impacts of permafrost thaw – A case study from Northern Canada. Atmosphere 13(5), 789. https://www.mdpi.com/2073-4433/13/5/789.

Terrains toxiques

Texte

Arctic Monitoring and Assessment Programme (2013). Transport of contaminants to the Arctic - atmospheric and aquatic transport. https://www.amap.no/documents/doc/transport-of-contaminants-to-the-arctic-atmospheric-and-acquatic-transport/944. Accessed 8 June 2023.

Arctic Monitoring and Assessment Programme (2018). AMAP Assessment 2018: Biological Effects of Contaminants on Arctic Fish and Wildlife. Tromsø, Norway. https://www.amap.no/documents/doc/amap-assessment-2018-biological-effects-of-contaminants-on-arctic-wildlife-and-fish/166.

Arctic Monitoring and Assessment Programme (2021). POPs and Chemicals of Emerging Arctic Concern: Influence of Climate Change. Summary for Policymakers. Tromsø, Norway. https://www.amap.no/documents/doc/pops-and-chemicals-of-emerging-arctic-concern-influence-of-climate-change.-summary-for-policy-makers/3511.

Dastoor, A., Angot, H., Bieser, J., Christensen, J.H., Douglas, T.A., Heimbürger-Boavida, L.-E. et al. (2022). Arctic mercury cycling. Nature Reviews Earth & Environment 3, 270–286. https://www.nature.com/articles/s43017-022-00269-w.

Langer, M., von Deimling, T.S., Westermann, S., Rolph, R., Rutte, R., Antonova, S. et al. (2023). Thawing permafrost poses environmental threat to thousands of sites with legacy industrial contamination. Nature Communications 14, 1721. https://www.nature.com/articles/s41467-023-37276-4.

Lim, A.G., Jiskra, M., Sonke, J.E., Loiko, S.V., Kosykh, N. and Pokrovsky, O.S. (2020). A revised pan-Arctic permafrost soil Hg pool based on Western Siberian peat Hg and carbon observations. Biogeosciences 17(12), 3083–3097. https://bg.copernicus.org/articles/17/3083/2020/.

Rudnicka-Kępa, P. and Zaborska, A. (2021). Sources, fate and distribution of inorganic contaminants in the Svalbard area, representative of a typical Arctic critical environment – A review. Environmental Monitoring and Assessment 193, 724. https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-021-09305-6.

Schuster, P.F., Schaefer, K.M., Aiken, G.R., Antweiler, R.C., Dewild, J.F., Gryziec, J.D. et al. (2018). Permafrost stores a globally significant amount of mercury. Geophysical Research Letters 45(3), 1463–1471. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2017GL075571.

Wang, X., Yuan, W., Lin, C.-J., Zhang, L., Zhang, H. and Feng, X. (2019). Climate and vegetation as primary drivers for global mercury storage in surface soil. Environmental Science & Technology 53(18), 10665–10675. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.9b02386.

Cartes

Schuster, P.F., Schaefer, K.M., Aiken, G.R., Antweiler, R.C., Dewild, J.F., Gryziec, J.D. et al. (2018). Permafrost stores a globally significant amount of mercury. Geophysical Research Letters 45(3), 1463–1471. https://doi.org/10.1002/2017GL075571.

Revenir à la vie

Texte

Biagini, P., Thèves, C., Géraut, A., Keyser, C., Nikolaeva, D., Gérard, P. et al. (2012). Variola virus in a 300-year-old Siberian mummy. The New England Journal of Medicine 367, 2057–2059. https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJMc1208124.

Carrasco-Hernandez, R., Jácome, R., López Vidal, Y. and Ponce de León, S. (2017). Are RNA viruses candidate agents for the next global pandemic? A Review. ILAR Journal 58(3), 343–358. https://academic.oup.com/ilarjournal/article/58/3/343/4107390.

Charlier, P., Héry-Arnaud, G., Coppens, Y., Malaurie, J., Hoang-Oppermann, V., Deps, P. et al. (2020). Global warming and planetary health: An open letter to the WHO from scientific and indigenous people urging for paleo-microbiology studies. Infection, Genetics and Evolution 82, 104284. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1567134820301155.

Christie, A. (2021). Blast from the past: Thawing permafrost could lead to future pandemics. Cambridge Journal of Science & Policy 2(2), 8 https://doi.org/10.17863/CAM.74501.
Duffy, S. (2018). Why are RNA virus mutation rates so damn high? PLOS Biology 16(8), e3000003. https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.3000003.
Enderle, R., Stenlid, J. and Vasaitis, R. (2019). An overview of ash (Fraxinus spp.) and the ash dieback disease in Europe. CABI Reviews 14, 1–12. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/PAVSNNR201914025.
Ezhova, E., Orlov, D., Suhonen, E., Kaverin, D., Mahura, A., Gennadinik, V. et al. (2021). climatic factors influencing the anthrax outbreak of 2016 in Siberia, Russia. EcoHealth 18, 217–228. https://link.springer.com/article/10.1007/s10393-021-01549-5.
Legendre, M., Lartigue, A., Bertaux, L., Jeudy, S., Bartoli, J., Lescot, M. et al. (2015). In-depth study of Mollivirus sibericum, a new 30,000-y-old giant virus infecting Acanthamoeba. PNAS 112(38), E5327–E5335. https://doi.org/10.1073/pnas.1510795112.
Revich, B., Tokarevich, N. and Parkinson, A. J. (2012). Climate change and zoonotic infections in the Russian Arctic. International Journal of Circumpolar Health 71(1), 18792. https://doi.org/10.3402/ijch.v71io.18792.
Schütte, U.M.E., Henning, J.A., Ye, Y., Bowling, A., Ford, J., Genet, H. et al. (2019). Effect of permafrost thaw on plant and soil fungal community in a boreal forest: Does fungal community change mediate plant productivity response? Journal of Ecology 107(4), 1737–1752. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13139.
Stocks, J.J., Metheringham, C.L., Plumb, W.J., Lee, S.J., Kelly, L.J., Nichols, R.A. et al. (2019). Genomic basis of European ash tree resistance to ash dieback fungus. Nature Ecology & Evolution 3, 1686–1696. https://doi.org/10.1038/s41559-019-1036-6.
Taubenberger, J.K., Hultin, J.V. and Morens, D.M. (2007). Discovery and characterization of the 1918 pandemic influenza virus in historical context. Antiviral Therapy 12(4 Pt B), 581–91. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17944266/.

Cartes

Arctic Council, Conservation of Arctic Flora and Fauna Working Group (2001). CAFF Map No. 28 – Distribution of wild reindeer, caribou, and domestic reindeer in the Arctic. Arctic Portal Library. http://library.arcticportal.org/1358/.
Stella, E., Mari, L., Gabrieli, J., Barbante, C. and Bertuzzo, E. (2021). Mapping environmental suitability for anthrax reemergence in the Arctic. Environmental Research Letters 16(10), 105013. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac2527/meta.

Actifs gelés I

Texte

Hope, C. and Schaefer, K. (2016). Economic impacts of carbon dioxide and methane released from thawing permafrost. Nature Climate Change 6, 56–59. https://doi.org/10.1038/nclimate2807.
Jungsberg, L., Ramage, J., Cordier, M., Vanderlinden, J-P., Vasivlevskaya, A. (2021). 7.5 Report on Permafrost Thawing, Natural Resource-based Economy, and Arctic Coastal Communities' Ability to Face the Associated Risks: An Integrated Strategic Framework. Nunataryuk: WP7–Natural Resources, Economy and Coastal Community Planning.
Larsen, J.N. and Fondahl, G. (eds.) (2015). Arctic Human Development Report: Regional Processes and Global Linkages. Copenhagen: Nordic Council of Ministers. http://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:788965/FULLTEXT03.pdf.
Melvin, A.M., Larsen, P., Boehlert, B., Neumann, J.E., Chinowsky, P., Espinet, X. et al. (2016). Climate change damages to Alaska public infrastructure and the economics of proactive adaptation. PNAS 114(2), E122–E131. https://doi.org/10.1073/pnas.1611056113.
Yumashev, D., Hope, C., Shaefer, K., Riemann-Campe, K., Iglesias-Suarez, F., Jafarov, E. et al. (2019). Climate policy implications of nonlinear decline of Arctic land permafrost and other cryosphere elements. Nature communications 10(1900). https://doi.org/10.1038/s41467-019-09863-x

Cartes

Jungsberg, L., Ramage, J., Cordier, M., Vanderlinden, J-P., Vasivlevskaya, A. (eds.) (2021). 7.5 Report on Permafrost Thawing, Natural Resource-based Economy, and Arctic Coastal Communities' Ability to Face the Associated Risks: An Integrated Strategic Framework. Deliverable Report, Grant Agreement number: 773421, H2020-BG-2016-2017/H2020-BG-2017-1. Nordregio, Stockholm.

Actifs gelés II

Texte

Glomsrød, S., Duhaime, G. and Aslaksen, I. (eds.) (2017). The Economy of the North 2015. Oslo: Statistics Norway. https://www.ssb.no/en/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/_attachment/299576?_ts=15aea97d740.
Jungsberg, L., Ramage, J., Cordier, M., Vanderlinden, J-P., Vasivlevskaya, A. (2021). 7.5 Report on Permafrost Thawing, Natural Resource-based Economy, and Arctic Coastal Communities' Ability to Face the Associated Risks: An Integrated Strategic Framework. Nunataryuk: WP7–Natural Resources, Economy and Coastal Community Planning.
Ramage, J., Jungsberg, L., Wang, S., Gartler, S., Meyer, A., Cordier, M. et al. (2020). Synthesis Report: Identifying and Recognizing the Value of Provisioning Permafrost Ecosystem Services in the Arctic. Nunataryuk: WP7–Natural Resources, Economy and Coastal Community Planning.

Cartes

Northwest Territories Bureau of Statistics (2018). Households Eating Meat or Fish Obtained from Hunting or Fishing by Community (1998 to 2018). https://www.statsnwt.ca/Traditional%20Activities/. Accessed 20 June 2023.
Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-Science Reviews 193, 299–316. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023.
Ramage, J., Jungsberg, L., Meyer, A. and Gartler, S. (2022). 'No longer solid': Perceived impacts of permafrost thaw in three Arctic communities. Polar Geography 45(3), 226–239. https://doi.org/10.1080/1088937X.2022.2105973.

Patrie culturelle

Texte

Crate, S.A. (2006). Cows, Kin and Globalization. An Ethnography of Sustainability. Walnut Creek. Walnut Creek, United States: AltaMira Press. https://rowman.com/ISBN/9780759107403/Cows-Kin-and-Globalization-An-Ethnography-of-Sustainability.
Crate, S.A. (2016). Gone with cows and kin? Climate, globalization, and youth alienation in Siberia. In Anthropology and Climate Change: From Actions to Transformations. Crate, S.A. and Nuttall, M. (eds.). Oxford, United Kingdom: Routledge. 139–161. https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781315530338-11/gone-cows-kin-climate-globalization-youth-alienation-siberia.
Crate, S.A. (2021). Once Upon the Permafrost: Knowing Culture And Climate Change in Siberia. Tucson, United States: University of Arizona Press. https://uapress.arizona.edu/book/once-upon-the-permafrost.
Crate, S., Ulrich, M., Habeck, J.O., Desyatkin, A.R., Desyatkin, R.V., Fedorov, A.N. et al. (2017). Permafrost livelihoods: A transdisciplinary review and analysis of thermokarst-based systems of indigenous land use. Anthropocene 18, 89–104. https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.06.001.
Czerniawska, J., and Chlachula, J. (2020). Climate-change induced permafrost degradation in Yakutia, East Siberia. Arctic 73(4), 509–528. https://www.jstor.org/stable/26991438.
Fedorov, A. N. (2022). Permafrost landscape research in the northeast of Eurasia. Earth 3 (1), 460–478. https://doi.org/10.3390/earth3010028eds.
Gavril'ev, P.P. (1991). Melioratsiia merzlotnykh zemel' v Iakutii [Melioration of permafrost grounds in Yakutia} Nauka, Novosibirsk. (In Russian)
Gabyshev, M. et al. (1929). O zemel'noi reforme v Iakutii: k VI vseiakutskomu s''ezdu sovetov [Russian edition].
Hubberten, H.W., Andreev, A., Astakhov, V.I., Demidov, I., Dowdeswell, J.A., Henriksen, M. et al. (2004). The periglacial climate and environment in northern Eurasia during the Last Glaciation. Quaternary Science Reviews 23(11-13), 1333–1357. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.012.

Maj, E. (2009). The horse of Sakha: Ethnic symbol in post-communist Sakha Republic (Iakutiia). Sibirica 8 (1), 68–74. https://doi.org/10.3167/sib.2009.080105.
Matveev, I.A. (1989). Atlas selskogo khozyaistva Yakutskoi ASSR. [Agricultural atlas of the Yakut ASSR]. Moskow: Glavnoe upravlenie geodezii i kartographii pri sovete ministerstvo SSSR. https://www.loc.gov/item/2018694181/.
Pekarski, E.K. 1958 [1899]. Slovar Iakutskogo Iazyka. [Dictionary of the Sakha language]. St Petersburg: Academy of Science.
Solovyev, P.A. (1973). Thermokarst phenomena and landforms due to frost heaving in central Yakutia. Periglacial Bulletin 23, 135–155.
Takakura, H. 2015. Arctic Pastoralist Sakha: Ethnography of Evolution and Microadaptation in Siberia. Melbourne: Trans Pacific Press. https://transpacificpress.com/products/arctic-pastoralist-sakha?variant=32554245324885.
Takakura, H. (2016). Limits of pastoral adaptation to permafrost regions caused by climate change among the Sakha people in the middle basin of Lena River. Polar Science 10(3), 395–403. https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.04.003.

Cartes

Crate, S., Ulrich, M., Habeck, J.O., Desyatkin, A.R., Desyatkin, R.V., Fedorov, A.N. et al. (2017). Permafrost livelihoods: A transdisciplinary review and analysis of thermokarst-based systems of indigenous land use. Anthropocene 18, 89–104. https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.06.001.
European Union Agency for the Space Programme (2020). Copernicus Data Space Ecosystem: Satellite Imagery for 3 June 2022. European Union Agency for the Space Programme. https://dataspace.copernicus.eu/. Accessed 20 June 2023.

Tenir bon

Une route semée d'embûches

Texte

Allard, M., Lemay, M., Barrette, C., L'Hérault, E. and Sarrazin, D. (2012). Permafrost and climate change in Nunavik and Nunatsiavut: Importance for municipal and transportation infrastructures. In Nunavik and Nunatsiavut: From Science to Policy – An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of Climate Change and Modernization. Allard, M. and Lemay, M. (eds.). Quebéc, Canada: ArcticNet Incorporated. Chapter 6. 171–197. https://www.researchgate.net/publication/264454915_Chapter_6_Permafrost_and_climate_change_in_Nunavik_and_Nunatsiavut_Importance_for_municipal_and_transportation_infrastructures. Accessed 30 June 2023.
Bartsch, A., Pointner, G., Nitze, I., Efimova, A., Jakober, D., Ley, S. et al. (2021). Expanding infrastructure and growing anthropogenic impacts along Arctic coasts. Environmental Research Letters 16(11), 115013. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac3176/pdf.
De Guzman, E.M. (2020). Structural Stability of Highway Embankments in the Arctic Corridor. Winnipeg, Canada: Department of Civil Engineering, University of Manitoba. https://mspace.lib.umanitoba.ca/handle/1993/35094.
Doré, G., Niu, F. and Brooks, H. (2016). Adaptation methods for transportation infrastructure built on degrading permafrost. Permafrost and Periglacial Processes 27(4), 352–364. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppp.1919.
Hjort, J., Streletskiy, D., Doré, G., Wu, Q., Bjella, K. and Luoto, M. (2022). Impacts of permafrost degradation on infrastructure. Nature Reviews Earth & Environment 3(1), 24–38. https://www.nature.com/articles/s43017-021-00247-8.
Lepage, J.M. and Doré, G. (2016). Experimentation Of Mitigation Techniques to Reduce the Effects of Permafrost Degradation on Transportation Infrastructures at Beaver Creek Experimental Road Site (Alaska Highway, Yukon). Québec, Canada: Department of Civil Engineering, Laval University. https://pubs.aina.ucalgary.ca/cpc/CPC6-526.pdf.
Shneider von Deimling, T., Lee, H., Ingeman-Nielsen, T., Westermann, S., Romanovsky, V., Lamoureux, S. et al. (2021). Consequences of permafrost degradation for Arctic infrastructure – Bridging the model gap between regional and engineering scales. The Cryosphere 15(5), 2451–2471. https://tc.copernicus.org/articles/15/2451/2021/.
Stern, G. and Gaden, A. (eds.) (2015). The impact of climate change on infrastructure in the western and central Canadian Arctic. In From Science to Policy in the Western and Central Canadian Arctic: An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of Climate Change and Modernization. Stern, G. and Gaden, A. (eds.). Quebéc, Canada: ArcticNet Incorporated. Chapter 7. 300–341. https://arcticnet.ulaval.ca/wp-content/uploads/2022/06/IRIS_FromScience_ArcticNet_lr_.pdf.
Streletskiy, D.A., Clemens, S., Lanckman, J.P. and Shiklomanov, N.I. (2023). The costs of Arctic infrastructure damages due to permafrost degradation. Environmental Research Letters 18, 014006. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/acab18/meta

Cartes

Hjort, J., Streletskiy, D., Doré, G., Wu, Q., Bjella, K. and Luoto, M. (2022). Impacts of permafrost degradation on infrastructure. Nature Reviews Earth & Environment 3, 24–38. https://doi.org/10.1038/s43017-021-00247-8.
Streletskiy, D.A., Clemens, S., Lanckman, J.P. and Shiklomanov, N.I. (2023). The costs of Arctic infrastructure damages due to permafrost degradation. Environmental Research Letters 18, 014006. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/acab18/meta

En terrain miné

Texte

Booshehrian, A., Wan, R. and Su, X. (2020). Hydraulic variations in permafrost due to open-pit mining and climate change: A case study in the Canadian Arctic. Acta Geotechnica 15, 883–905. https://link.springer.com/article/10.1007/s11440-019-00786-x.
Davies, M. (2011). Filtered dry stacked tailings – The fundamentals. Tailings and Mine Waste. Vancouver, BC, 6–9 November 2011. Vancouver: University of British Columbia. 1–9. https://open.library.ubc.ca/media/stream/pdf/59368/1.0107683/1.
Glomsrød, S., Duhaime, G. and Aslaksen, I. (eds.) (2021). The Economy of the North. ECONOR 2020. Oslo: Statistisk sentralbyrå, Statistics Norway. https://www.chaireconditionautochtone.fss.ulaval.ca/doc/Publication/ECONOR-2020-FinalReport-20May2021_LOW.pdf
International Council on Mining and Metals (2019). Adapting to Climate Change: Building Resilience in the Mining and Metals Industry. London. https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/environmental-stewardship/2019/guidance_changing-climate.pdf.
Kolb, J., Rosa, D., Thrane, K., & Keiding, J. K. (2016). Greenland. In R. Boyd, T. Bjerkgård, B. Nordahl, & H. Schiellerup (Eds.), Mineral resources in the Arctic (pp. 162-189). (Geological Survey of Norway Special Publication.). Geological Survey of Norway. https://www.ngu.no/upload/Aktuelt/CircumArtic/Mineral_Resources_Arctic_Shortver_Eng.pdf
Medeiros, A.S., Wood, P., Wesche, S.D., Bakaic, M. and Peters, J.F. (2017). Water security for northern peoples: Review of threats to Arctic freshwater systems in Nunavut, Canada. Regional Environmental Change 17(3), 635–647. https://link.springer.com/article/10.1007/s10113-016-1084-2.
Stephani, E., Angelopouloss, M., Musial, M., Anderson, S., Gince, P. and Kissiova, M. (2016). Investigation and management of permafrost and groundwater conditions at mining sites: Case studies in continuous permafrost of Alaska and Canada. Eleventh International Conference on Permafrost: Exploring Permafrost in a Future Earth. Potsdam, Germany, 20–24 June 2016. 1146–1147. https://simmakers.com/wp-content/uploads/icop2016/icop2016_book_of_abstracts.pdf

Cartes

Boyd, R., Bjerkgård, T., Nordahl, B. and Schiellerup, H. (eds.) (2016). Mineral Resources in the Arctic: An Introduction. Trondheim, Norway: NGU – Geological Survey of Norway. https://www.ngu.no/upload/Aktuelt/CircumArtic/Mineral_Resources_Arctic_Shortver_Eng.pdf.
Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-Science Reviews 193, 299–316. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023.

Garder la lumière allumée

Texte

Biev, A.A. and Serova, N.A. (2020). Features of the organization of fuel supplies to the Arctic regions of Russia: Assessment of transport conditions. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 539, 012017. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/539/1/012017/pdf.

Cherry, J.E., Knapp, C., Trainor, S., Ray, A.J., Tedesche, M. and Walker, S. (2017). Planning for climate change impacts on hydropower in the Far North. Hydrology and Earth System Sciences 21(1), 133–151. https://hess.copernicus.org/articles/21/133/2017/hess-21-133-2017.pdf.

Dilley, L M. and Hulse, L. (2007). Foundation Design of Wind Turbines in Southwestern Alaska, a Case Study. Anchorage, Alaska: Institute of the North. https://helicalpileworld.com/Ren-13%20Foundation%20Design%20of%20Wind%20Turbines.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Chen, Y. et al. (eds.). Cambridge, UK and New York, US: Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/.

Lenio, M. (2020). Nunavut residents need support for renewables, 22 October. https://wwf.ca/stories/nunavut-residents-need-support-for-renewables/. Accessed 31 May 2023.

Natural Resources Canada (2021). Glencore RAGLAN Mine Renewable Electricity Smart-Grid Pilot Demonstration, 9 March. https://www.nrcan.gc.ca/science-and-data/funding-partnerships/funding-opportunities/current-investments/glencore-raglan-mine-renewable-electricity-smart-grid-pilot-demonstration/16662. Accessed 31 May 2023.

Nogovitsyn, D.D., Sheina, Z.M. and Sergeeva, L.P. (2020). Influence of the Vilyui hydropower plant on the regime of the Vilyui River. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 579, 012031. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/579/1/012031/pdf.

Panfilov, A.A. (2018). Features of calculation schemes and methods for design of wind turbine foundations for Arctic conditions. 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon). Chelyabinsk, Russia, 4–8 October 2018. 122–126. https://ieeexplore.ieee.org/document/8544376.

Salonen, H. (2021). All habits die hard: Exploring the path dependence and lock-ins of outdated energy systems in the Russian Arctic. Energy Research & Social Science 78, 102149. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629621002425.

Zheng, M., Yang, Z.J., Yang, S. and Still, B. (2017). Modeling and mitigation of excessive dynamic responses of wind turbines founded in warm permafrost. Engineering Structures 148, 36–46. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029617301876.

Cartes

Norwegian Directorate for Cultural Heritage (2022). Kulturminner – Lokaliteter, Enkeltimmen og Sikringssoner. Geonorge. https://kartkatalog.geonorge.no/metadata/kulturminner-lokaliteter-enkeltminner-og-sikringssoner/c72906a0-2bc2-41d7-bea2-c92d368e3c49. Accessed 20 June 2023.

Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-Science Reviews 193, 299–316. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023.

Pas de temps à perdre

Texte

Arctic Council (2021). Tackling waste pollution in the Arctic with community empowerment, 10 May. https://arctic-council.org/news/tackling-waste-pollution-in-the-arctic-with-community-empowerment/. Accessed 31 May 2023.

Burns, C., Orttung, R.W., Shaiman, M., Silinsky, L. and Zhang, E. (2021). Solid waste management in the Arctic. Waste Management 126, 340–350. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X2100163X.

Grebenets, V.I., Tolmanov, V.A., Iurov, F.D. and Groisman, P.Y. (2021). The problem of storage of solid waste in permafrost. Environmental Research Letters 16(10), 105007. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac2375/pdf.

Hjort, J., Streletskiy, D., Doré, G., Wu, Q., Bjella, K. and Luoto, M. (2022). Impacts of permafrost degradation on infrastructure. Nature Reviews Earth & Environment 3, 24–38. https://www.nature.com/articles/s43017-021-00247-8.

Magee, G.L. and Rice, W.J. (2002). Rethinking landfill development and operation in permafrost regions. 11th International Conference on Cold Regions Engineering: Cold Regions Impacts on Transportation and Infrastructure. Anchorage, Alaska, 20–22 May 2002. 910–921. Reston, Virginia, United States: American Society of Civil Engineers. https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40621%28254%2979.

Sustainable Development Working Group (2019). Best Waste Management Practices for Small and Remote Arctic Communities: A Study of Best Waste Management Practices Used in Remote Arctic Communities in Alaska, Canada, and Finland. Tromsø, Norway: Arctic Council. https://oaarchive.arctic-council.org/bitstream/handle/11374/2297/SAOFI204_2019_RUKA_07-01-06_SDWG_Report-Waste-Management-Best-Practices.pdf.

United States of America, Alaska Administrative Code, Title 18 – Environmental Conservation, Chapter 60 – Solid Waste Management, Article 2 – Waste Disposal Permit, Section 18 AAC 60.228 – Exemptions for Freezeback Landfills. https://www.law.cornell.edu/regulations/alaska/18-AAC-60.228.

Histoire moderne

Texte

Markkula, I., Turunen, M. and Rasmus, S. (2019). A review of climate change impacts on the ecosystem services in the Saami Homeland in Finland. Science of the Total Environment 692, 1070–1085. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719333868.

Nicu, I.C., Tanyas, H., Rubensdotter, L. and Lombardo, L. (2022). A glimpse into the northernmost thermo-erosion gullies in Svalbard archipelago and their implications for Arctic cultural heritage. Catena 212, 106105. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816222000911.

Norway, Svalbard Environmental Protection Act 2001, Act of 15 June 2001, No. 79, Relating to the Protection of the Environment in Svalbard. https://www.regjeringen.no/en/dokumenter/svalbard-environmental-protection-act/id173945/.

Sinitsyn, A., Westermann, S., Arlov, T.B., Meyer, A., Lutz, J., Bekele, Y.W. et al. (2022). PCCH-Arctic – Polar climate and cultural heritage – Preservation and restoration management: Project presentation and current results. Frostdagen 2022 at Norwegian Geotechnical Society. Oslo, 24 November 2022. Oslo: SINTEF Community. https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/3035461.

Statistics Norway (2016). This is Svalbard 2016: What the Figures Say. Oslo: Statistisk sentralbyrå, Statistics Norway. https://www.ssb.no/en/befolkning/artikler-og-publikasjoner/_attachment/294354?_ts=15a12de02c0.

Cartes

Langer, M., Schneider von Deimling, T., Westermann, S., Rolph, R., Rutte, R., Antonova, S. et al. (2023). Thawing permafrost poses environmental threat to thousands of sites with legacy industrial contamination. Nature Communications 14, 1721. https://doi.org/10.1038/s41467-023-37276-4.

Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-Science Reviews 193, 299–316. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023.

Vers le sud

Une perspective planétaire

Texte

Haeberli, W., Noetzli, J., Arenson, L., Delaloye, R., Gärtner-Roer, I., Gruber, S. et al. (2010). Mountain permafrost:

Development and challenges of a young research field. Journal of Glaciology 56(200), 1043–1058. https://doi.org/10.3189/002214311796406121.
Yoshikawa, K., Schorghofer, N. and Klasner, F. (2023). Permafrost and seasonal frost thermal dynamics over fifty years on tropical Maunakea volcano, Hawai'i. Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 55, 1. https://doi.org/10.1080/15230430.2023.2186485

Cartes

Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-Science Reviews 193, 299–316. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023.
Obu, J., Westermann, S., Kääb, A. and Bartsch, A. (2019). Ground Temperature Map, 2000–2016, Andes, New Zealand and East African Plateau Permafrost. University of Oslo, PANGAEA. https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.905512. Accessed 20 June 2023.
Obu, J., Westermann, S., Vieira, G., Abramov, A., Balks, M.R., Bartsch, A. et al. (2020). Pan-Antarctic map of near-surface permafrost temperatures at 1 km² scale. The Cryosphere 14(2), 497–519. https://doi.org/10.5194/tc-14-497-2020.
Overduin, P.P., Schneider von Deimling, T., Miesner, F., Grigoriev, M.N., Ruppel, C., Vasiliev, A. et al. (2019). Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP). Journal of Geophysical Research: Oceans 124(6), 3490–3507. https://doi.org/10.1029/2018JC014675.

Géants de glace

Texte

Biskaborn, B.K., Smith, S.L., Noetzli, J., Matthes, H., Vieira, G., Streletskiy, D.A. et al. (2019). Permafrost is warming at a global scale. Nature Communications 10(264). https://www.nature.com/articles/s41467-018-08240-4.
Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y. et al. (2019). High mountain areas. In The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pörtner, H.-O., Masson-Delmotte, V., Roberts, D.C., Tignor, M., Zhai, P., Poloczanska, E. et al. (eds.). Cambridge, UK and New York, US: Cambridge University Press. 39–70. https://www.ipcc.ch/srocc/.
Jin, X., Jin, H., Luo, D., Sheng Y., Wu, Q., Wu, J. et al. (2022). Impacts of permafrost degradation on hydrology and vegetation in the source area of the Yellow River on northeastern Qinghai-Tibet Plateau, southwest China. Frontiers in Earth Science 10. https://doi.org/10.3389/feart.2022.845824.
Jones, D.B., Harrison, S., Anderson, K. and Betts, R.A. (2018). Mountain rock glaciers contain globally significant water stores. Scientific Reports 8(1), 1–10. https://doi.org/10.1038/s41598-018-21244-w.
Schneider von Deimling, T., Lee, H., Ingeman-Nielsen, T., Westermann, S., Romanovsky, V., Lamoureux, S. et al. (2021). Consequences of permafrost degradation for Arctic infrastructure – Bridging the model gap between regional and engineering scales. The Cryosphere 15(5), 2451-2471. https://doi.org/10.5194/tc-15-2451-2021.

Cartes

NASA Shuttle Radar Topography Mission (2013).Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global. OpenTopography. https://portal.opentopography.org/datasetMetadata?otCollectionID=OT.042013.4326.1 Accessed 20 June 2023. https://doi.org/10.5069/G9445JDF.
Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-Science Reviews 193, 299–316. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023.
Obu, J., Westermann, S., Kääb, A. and Bartsch, A. (2019). Ground Temperature Map, 2000–2016, Andes, New Zealand and East African Plateau Permafrost. University of Oslo, PANGAEA. https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.905512. Accessed 20 June 2023.
Obu, J., Westermann, S., Vieira, G., Abramov, A., Balks, M.R., Bartsch, A. et al. (2020). Pan-Antarctic map of near-surface permafrost temperatures at 1 km² scale. The Cryosphere 14(2), 497–519. https://doi.org/10.5194/tc-14-497-2020.

La vue du sommet

Texte

Arenson, L.U., Harrington, J.S., Koenig, C.E. and Wainstein, P.A. (2022). Mountain permafrost hydrology—A practical review following studies from the Andes. Geosciences 12(2), 48. https://doi.org/10.3390/geosciences12020048.
Baldis, C.T. and Liaudat, T.D. (2019). Rockslides and rock avalanches in the Central Andes of Argentina and their possible association with permafrost degradation. Permafrost and Periglacial Processes 30(4), 330–347. https://doi.org/10.1002/ppp.2024.
Barsch, D. (1996). Rockglaciers and the high mountain environment. In Rockglaciers – Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments. Springer Series in Physical Environment vol. 16. Berlin: Springer Berlin Heidelberg. Chapter 10. 231–268. https://doi.org/10.1007/978-3-642-80093-1_11.
Bellisario, A., Ferrando, F. and Janke, J. (2013). Water resources in Chile: The critical relation between glaciers and mining for sustainable water management. Investigaciones Geográficas 46(2013), 3–24. https://doi.org/10.5354/0719-5370.2013.30288.
Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S. and Noetzli, J. (2012). Permafrost distribution in the European Alps: Calculation and evaluation of an index map and summary statistics. The Cryosphere 6(4), 807-820. https://doi.org/10.5194/tc-6-807-2012.
Brain, K.A. (2017). The impacts of mining on the livelihoods in the Andes: A critical overview. The Extractive Industries and Society 4(2), 410–418. https://doi.org/10.1016/j.exis.2017.03.001.
Gruber, S. and Haeberli, W. (2009). Mountain permafrost. In Permafrost Soils. Margesin, R. (ed.). Soil Biology 16, 33–44. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69371-0_3.
Gruber, S., Fleiner, R., Guegan E. et al. (2017). Review article: Inferring permafrost and permafrost thaw in the mountains of the Hindu Kush Himalaya region. The Cryosphere, 11, pp. 81-99. https://doi.org/10.5194/tc-11-81-2017
Hjort, J., Streletskiy, D., Doré, G., Wu, Q., Bjella, K. and Luoto M. (2022). Impacts of permafrost degradation on infrastructure. Nature Reviews Earth & Environment 3(1), 24–38. https://doi.org/10.1038/s43017-021-00247-8.
Jin, X., Jin, H., Luo, D., Sheng Y., Wu, Q., Wu, J. et al. (2022). Impacts of permafrost degradation on hydrology and vegetation in the source area of the Yellow River on northeastern Qinghai-Tibet Plateau, southwest China. Frontiers in Earth Science 10. https://doi.org/10.3389/feart.2022.845824.
Jones, D.B., Harrison, S., Anderson, K. and Betts, R.A. (2018). Mountain rock glaciers contain globally significant water stores. Scientific Reports 8(1), 1–10. https://doi.org/10.1038/s41598-018-21244-w.
Kääb, A., Kaufmann, V., Ladstädter, R. and Eiken, T. (2003). Rock glacier dynamics: Implications from high-resolution measurements of surface velocity fields. Eighth International Conference on Permafrost. Phillips, M., Springman, S.M. and Arenson, L.U. (eds.). Zürich, 21–25 July 2003. Lisse, Netherlands: Swets & Zeitlinger. 501–506. https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann/Chapter_089.pdf.
Lu, Q., Zhao, D. and Wu, S. (2017). Simulated responses of permafrost distribution to climate change on the Qinghai–Tibet Plateau. Scientific Reports 7(3845). https://doi.org/10.1038/s41598-017-04140-7.
Peng, X., Zhang, T., Frauenfeld, O.W., Wang, K., Luo, D., Cao, B. et al. (2018). Spatiotemporal changes in active layer thickness under contemporary and projected climate in the northern hemisphere. Journal of Climate 31(1), 251–266. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0721.1.
Rangecroft, S., Suggitt, A.J., Anderson, K. and Harrison, S. (2016). Future climate warming and changes to mountain permafrost in the Bolivian Andes. Climatic Change 137(1–2), 231–243. https://doi.org/10.1007/s10584-016-1655-8.

Ruiz, L. and Trombotto, D. (2012). Mountain permafrost distribution in the Andes of Chubut (Argentina) based on a statistical model. Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost. Hinkel, K.M. (ed.). Salekhard, Russian Federation, 25–29 June 2012. Salekhard: The Northern Publisher. 365–370. https://www.permafrost.org/conference-proceedings/.

Streletskiy, D. (2021). Permafrost degradation. In Snow and ice-related hazards, risks, and disasters. Haeberli, W. and Whiteman, C. (eds.). Hazards and Disasters Series, 297–322. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817129-5.00021-4.

Wei, D., Qi, Y., Ma, Y. and Wang, X. (2021). Plant uptake of CO2 outpaces losses from permafrost and plant respiration on the Tibetan Plateau. PNAS 118(33), e2015283118. https://doi.org/10.1073/pnas.2015283118.

Zhang G., Nan, Z., Hu, N., Yin, Z., Zhao, L., Cheng, G. et al. (2022). Qinghai-Tibet Plateau permafrost at risk in the late 21st century. Earth's Future 10(6), e2022EF002652. https://doi.org/10.1029/2022EF002652.

Zou, D., Zhai, L., Sheng, Y., Chen, J., Hu, G., Wu, T. et al. (2017). A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau. The Cryosphere 11(6), 2527–2542. https://doi.org/10.5194/tc-11-2527-2017.

Cartes

Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A. et al. (2019). Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. Earth-Science Reviews 193, 299–316. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023.

Obu, J., Westermann, S., Kääb, A. and Bartsch, A. (2019). Ground Temperature Map, 2000–2016, Andes, New Zealand and East African Plateau Permafrost. University of Oslo, PANGAEA. https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.905512. Accessed 20 June 2023.

Le cœur gelé de l'Europe

Texte

Allen, S. and Huggel, C. (2013). Extremely warm temperatures as a potential cause of recent high mountain rockfall. Global and Planetary Change 107, 59–69. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.04.007.

Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S. and Noetzli, J. (2012). Permafrost distribution in the European Alps: Calculation and evaluation of an index map and summary statistics. The Cryosphere 6(4), 807-820. https://doi.org/10.5194/tc-6-807-2012.

Guerin, A., Ravanel, L., Matasci, B., Jaboyedoff, M. And Deline, P. (2020). The three-stage rock failure dynamics of the Drus (Mont Blanc massif, France) since the June 2005 large event. Scientific Reports 10, 17330. https://doi.org/10.1038/s41598-020-74162-1.

Haeberli, W. and Gruber, S. (2009). Global warming and mountain permafrost. In Permafrost Soils. Margesin, R. (ed.). Soil Biology 16, 33–44. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69371-0_14.

Haeberli, W., Barsch, D., Brown, J., Guodong, C., Corte, A.E., Dramis, F. et al. (1998). Mapping, modelling and monitoring of mountain permafrost: a review of ongoing programs. Mountain permafrost working group report. Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost. Lewkowicz, A.G. and Allard, M. (eds.). Yellowknife, Canada, 23–27 June 1998. Ottawa and Québec: University of Ottawa and Université Laval. 233–246. https://www.uspermafrost.org/conference-proceedings.

Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y. et al. (2019). High mountain areas. In The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pörtner, H.-O., Masson-Delmotte, V., Roberts, D.C., Tignor, M., Zhai, P., Poloczanska, E. et al. (eds.). Cambridge, UK and New York, US: Cambridge University Press. 39–70. https://www.ipcc.ch/srocc/.

Mourey, J., Perrin-Malterre, C. and Ravanel, L. (2020). Strategies used by French Alpine guides to adapt to the effects of climate change. Journal of Outdoor Recreation and Tourism 29, 100278. https://doi.org/10.1016/j.jort.2020.100278.

Weber, S., Beutel, J., Forni, R.D., Geiger, A., Gruber, S., Hasler, A. et al. (2019). A decade of detailed observations (2008–2018) in steep bedrock permafrost at the Matterhorn Hörnligrat (Zermatt, CH). Earth System Science Data 11(3), 1203–1237. https://doi.org/10.5194/essd-11-1203-2019.

Cartes

Guerin, A., Ravanel, L., Matasci, B., Jaboyedoff, M. and Deline, P. (2020). The three-stage rock failure dynamics of the Drus (Mont Blanc massif, France) since the June 2005 large event. Scientific Reports 10, 17330. https://doi.org/10.1038/s41598-020-74162-1.

Obu, J., Westermann, S., Kääb, A. and Bartsch, A. (2019). Ground Temperature Map, 2000–2016, Andes, New Zealand and East African Plateau Permafrost. University of Oslo, PANGAEA. https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.905512. Accessed 20 June 2023.

Les extrémités de la Terre I

Texte

Burton-Johnson, A., Black, M., Fretwell, P.T. and Kaluza-Gilbert, J. (2016). An automated methodology for differentiating rock from snow, clouds and sea in Antarctica from Landsat 8 imagery: A new rock outcrop map and area estimation for the entire Antarctic continent. The Cryosphere 10, 1665–1677. https://doi.org/10.5194/tc-10-1665-2016.

Convey, P., Chown, S.L., Clarke, A., Barnes, D.K.A., Cummings, V., Ducklow, H. et al. (2014). The spatial structure of Antarctic biodiversity. Ecological Monographs 84(2), 203–244. https://doi.org/10.1890/12-2216.1.

Gray, A., Krolikowski, M., Fretwell, P., Convey, P., Peck, L.S., Mendelova, M. et al. (2020). Remote sensing reveals Antarctic green snow algae as important terrestrial carbon sink. Nature Communications 11(2527). https://doi.org/10.1038/s41467-020-16018-w.

Guglielmin, M., Fratte, M.D. and Cannone, N. (2014). Permafrost warming and vegetation changes in continental Antarctica. Environmental Research Letter 9(4), 045001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/045001.

Medley, B., McConnell, J.R., Neumann, T.A., Reijmer, C.H., Chellman, N., Sigl, M. et al. (2018). Temperature and snowfall in western Queen Maud Land increasing faster than climate model projections. Geophysical Research Letters 45(3), 1472–1480. https://doi.org/10.1002/2017GL075992.

Obu, J., Westermann, S., Vieira, G., Abramov, A., Balks, M.R., Bartsch, A. et al. (2020). Pan-Antarctic map of near-surface permafrost temperatures at 1km2 scale. The Cryosphere 14(2), 497-519. https://doi.org/10.5194/tc-14-497-2020.

Philippe, M., Tison, J.-L., Fjøsne, K., Hubbard, B., Kjær, H.A., Lenaerts, J.T.M. et al. (2016). Ice core evidence for a 20th century increase in surface mass balance in coastal Dronning Maud Land, East Antarctica. The Cryosphere 10(5), 2501–2516. https://doi.org/10.5194/tc-10-2501-2016.

Potapowicz, J., Szumińska, D., Szopińska, M. and Polkowska, Ż. (2019). The influence of global climate change on the environmental fate of anthropogenic pollution released from the permafrost: Part I. Case study of Antarctica. Science of the Total Environment 651, 1534–1548. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.168.

Turner, J., Lu, H., King, J., Marshall, G.J., Phillips, T., Bannister, D. et al. (2021). Extreme temperatures in the Antarctic. Journal of Climate 34(7), 2653–2668. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0538.1.

Vieira, G., Bockheim, J., Guglielmin, M., Balks, M., Abramov, A.A., Boelhouwers, J. et al. (2010). Thermal state of permafrost and active-layer monitoring in the Antarctic: Advances during the international polar year 2007–2009. Permafrost and Periglacial Process 21(1), 182–197. https://doi.org/10.1002/ppp.685.

Cartes

Matsuoka, K., Skoglund, A., Roth, G., de Pomereu, J., Griffiths, H., Headland, R. et al. (2021). Quantarctica, an integrated mapping environment for Antarctica, the Southern Ocean, and sub-Antarctic islands. Environmental Modelling & Software 140, 105015. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105015.

Obu, J., Westermann, S., Vieira, G., Abramov, A., Balks, M.R., Bartsch, A. et al. (2020). Pan-Antarctic map of near-surface permafrost temperatures at 1 km² scale. The Cryosphere 14(2), 497–519. https://doi.org/10.5194/tc-14-497-2020.

Les extrémités de la Terre II

Texte

Melting History (2020). The waiting game II : A climate change issue? Melting History. https://meltinghistory.org/blog/the-waiting-game-ii-a-climate-change-issue. [Accessed 15 March 2022].

Obu, J., Westermann, S., Vieira, G., Abramov, A., Balks, M.R., Bartsch, A. et al. (2020). Pan-Antarctic map of near-surface permafrost temperatures at 1 km2 scale, The Cryosphere 14(2), 497–519. https://doi.org/10.5194/tc-14-497-2020.

Ramos, M., Vieira, G., de Pablo, M.A., Molina, A. and Jimenez, J.J. (2020). Transition from a subaerial to a subnival permafrost temperature regime following increased snow cover (Livingston Island, maritime Antarctic). Atmosphere 11(12), 1332. https://doi.org/10.3390/atmos11121332.

Turner, J., Lu, H., King, J., Marshall, G.J., Phillips, T., Bannister, D. et al. (2021). Extreme temperatures in the Antarctic. Journal of Climate 34(7), 2653–2668. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0538.1.

Cartes

Mapping Application for Penguin Populations and Projected Dynamics (2021). MAPPPD v4.1. Oceanites Inc. https://www.penguinmap.com/mapppd/. Accessed 20 June 2023.

Matsuoka, K., Skoglund, A., Roth, G., de Pomereu, J., Griffiths, H., Headland, R. et al. (2021). Quantarctica, an integrated mapping environment for Antarctica, the Southern Ocean, and sub-Antarctic islands. Environmental Modelling & Software 140, 105015. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105015.

Obu, J., Westermann, S., Vieira, G., Abramov, A., Balks, M.R., Bartsch, A. et al. (2020). Pan-Antarctic map of near-surface permafrost temperatures at 1 km² scale. The Cryosphere 14(2), 497–519. https://doi.org/10.5194/tc-14-497-2020.

Les extrémités de la Terre III

Texte

Goordial, J., Davila, A., Lacelle, D., Pollard, W., Marinova, M.M., Greer, C.W. et al. (2016). Nearing the cold-arid limits of microbial life in permafrost of an upper dry valley, Antarctica. The ISME Journal 10(7), 1613–1624. https://doi.org/10.1038/ismej.2015.239.

Heldmann J.L., Pollard, W., McKay, C.P., Marinova, M. M., Davila, A., Williams, K. E. et al. (2013). The high elevation Dry Valleys in Antarctica as analog sites for subsurface ice on Mars. Planetary and Space Science 85, 53-58. https://doi.org/10.1016/j.pss.2013.05.019.

Marchant D.R. and Head III, J.W. (2007). Antarctic dry valleys: Microclimate zonation, variable geomorphic processes, and implications for assessing climate change on Mars. Icarus 192(1), 187–222. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2007.06.018.

Medley, B., McConnell, J.R., Neumann, T.A., Reijmer, C.H., Chellman, N., Sigl, M. et al. (2018). Temperature and snowfall in western Queen Maud Land increasing faster than climate model projections. Geophysical Research Letters 45(3), 1472–1480. https://doi.org/10.1002/2017GL075992.

Philippe, M., Tison, J.-L., Fjøsne, K., Hubbard, B., Kjær, H.A., Lenaerts, J.T.M. et al. (2016). Ice core evidence for a 20th century increase in surface mass balance in coastal Dronning Maud Land, East Antarctica, The Cryosphere 10(5), 2501–2516. https://doi.org/10.5194/tc-10-2501-2016.

Verret, M., Dickinson, W., Lacelle, D., Fisher, D., Norton, K., Chorley, H. et al. (2021). Cryostratigraphy of mid-Miocene permafrost at Friis Hills, McMurdo Dry Valleys of Antarctica. Antarctic Science 33(2), 174–188. https://doi.org/10.1017/S0954102020000619.

Cartes

Matsuoka, K., Skoglund, A., Roth, G., de Pomereu, J., Griffiths, H., Headland, R. et al. (2021). Quantarctica, an integrated mapping environment for Antarctica, the Southern Ocean, and sub-Antarctic islands. Environmental Modelling & Software 140, 105015. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105015.

Obu, J., Westermann, S., Vieira, G., Abramov, A., Balks, M.R., Bartsch, A. et al. (2020). Pan-Antarctic map of near-surface permafrost temperatures at 1 km² scale. The Cryosphere 14(2), 497–519. https://doi.org/10.5194/tc-14-497-2020.

Glossaire et acronymes

van Everdingen, R.O. (2005). Multi-language Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms. Calgary, Canada: Arctic Institute of North America and University of Calgary. https://globalcryospherewatch.org/reference/glossary_docs/Glossary_of_Permafrost_and_Ground-Ice_IPA_2005.pdf.

Auteurs et remerciements

Conseil consultatif de NUNATARYUK
Donald Forbes, chercheur émérite à la Commission géologique du Canada et à l'Institut océanographique de Bedford
Johnnie (JD) Storr, Directeur, Comité des chasseurs et des trappeurs, Aklavik, Canada
Margareta Johansson, Coordinatrice du projet européen INTERACT
Nicole Biebow, Coordinatrice du projet Polar-Net 2 de l'UE

Conseil consultatif de la cartographie et de la conception
Alexander M. Tait, National Geographic Society
Margaret Pearce, cartographe indépendante
Oliver Uberti Creative
Adolfo Arranz, South China Morning Post
Lauren C. Tierney, The Washington Post

L'équipe éditoriale
Levi Westerveld, GRID-Arendal
Tiina Kurvits, GRID-Arendal
Tina Schoolmeester, GRID-Arendal
Oda Bortheim Mulelid, GRID-Arendal
Torjus Solheim Eckhoff, GRID-Arendal
Pier Paul Overduin, AWI
Michael Fritz, AWI
Hugues Lantuit, AWI

Cartographie
Levi Westerveld, GRID-Arendal
Alexander M. Tait, National Geographic Society (page 23 et 75)

Illustrations
Olga Borjon-Privé (Oluko)

Photographie
Katie Orlinsky

Mise en page
GRID-Arendal

Révision
Strategic Agenda
Guendalina De Luigi, GRID-Arendal

Page de couverture
Étangs de dégel du pergélisol à BGR, bassin versant de la rivière Sheldrake, Umiujaq (Nunavik, Québec, Canada). Levé par drone et orthomosaïque modifiés d'après G. Vieira, C. Mora et P. Freitas, Projet THAWPOND, PROPOLAR, CEG/IGOT, Université de Lisbonne et CEN, Université Laval.

Experts et contributeurs (par ordre alphabétique)

Portraits
Entretiens réalisés par Torjus Solheim Eckhoff, Susanna Gartler, Thomas Ingeman-Nielsen et Levi Westerveld.
Entretiens édités par Guendalina De Luigi, Torjus Solheim Eckhoff, Tiina Kurvits, Tina Schoolmeester et Levi Westerveld.

Personnes interrogées
Gwen Healey Akearok, directeur exécutif, Centre de recherche en santé Qaujigiartiit, Iqaluit, Nunavut Canada
Angus Alunik, Région de colonisation des Inuvialuit, Programme de surveillance communautaire, Inuvik, T.N.-O.
Annett Bartsch, PDG et scientifique principale chez b.goes GmbH, Autriche
Susanna Gartler, doctorante à l'université d'Amsterdam de Vienne, Autriche
Palle Jerimiassen, maire de la municipalité d'Avannaata, Kalaallit Nunaat (Groenland)
Jessi Pascal, coordinatrice environnementale à l'Office des ressources renouvelables des Gwich'in, Aklavik, T.N.-O. Canada
Ingrid Rekkavik, conseillère à Kings Bay AS, Ny Ålesund, Norvège
Vyacheslav Shadrin, président du conseil des anciens du peuple Youkaghir, Nelemnoye, Russie
Dmitry Streletstkiy, professeur agrégé de géographie et d'affaires internationales à l'Université d'Helsinki et l'Université George Washington, États-Unis

Le congélateur de la Terre : Introduction au pergélisol
Auteur principal : Tiina Kurvits, GRID-Arendal
Michael Fritz
Leneisja Jungsberg
Amelie Lindgren
Frederieke Miesner
Pier Paul Overduin
Philip Pika
Justine Ramage
Gonçalo Vieira

Le réveil d'un géant : Le pergélisol et le changement climatique
Auteur principal : Tiina Kurvits, GRID-Arendal
Sandra Arndt
Victor Brovkin
Sarah Chadburn
Michael Fritz
Gustaf Hugelius
Thomas Kleinen
Constance Lefebvre
Susanne Liebner
Pier Paul Overduin
Emilia Ridolfi
Maria Scheel
Jorien Vonk
Dirk Wagner

Des terrains en mouvement : Les changements du pergélisol
Auteur principal : Tiina Kurvits, GRID-Arendal
Michael Fritz
Örjan Gustafsson
Bennet Juhls
Frederieke Meisner
David Nielsen
Pier Paul Overduin
Tina Schoolmeester
Niek Speetjens
Gonçalo Vieira
Jorien Vonk

Frissons arctiques : Impacts du dégel du pergélisol
Auteur principal : Björn Alfthan, GRID-Arendal
Khaled Abass
Susan A. Crate
Otto Habeck
Jan Hjort
Thomas Ingeman-Nielsen
Lenesja Jungsberg
Olli Karjalainen
Franz Krause
Joan Nymand Larsen
Justine Ramage
Arja Rautio
Rebecca Rolph
Peter Schweitzer
Elisa Stella
Dmitry Streletskiy
Rodrigue Tanguy
Ulla Timlin
Mathias Ulrich
Anna Vasilevskaya
Gonçalo Vieira
Sebastian Westermann

Tenir bon : Adaptation au dégel du pergélisol
Auteur principal : Torjus Solheim Eckhoff, GRID-Arendal
Lukas Arenson
Scott Dallimore
Guy Dore
Jan Hjort
Arne Instanes
Alexandra Meyer
Peter Schweitzer

Vers le sud : Le pergélisol dans d'autres régions
Auteur principal : Anna Sinisalo, GRID-Arendal
Elaine Baker
Michael Fritz
Stephan Gruber
Peter Harris
Florence Magnin
Gonçalo Vieira
Ludovic Ravanel

Au-delà de l'horizon
Auteur principal : Pier Paul Overduin, AWI
Tiina Kurvits
Tina Schoolmeester

Examen externe
Christopher Burn, président de l'Association internationale du pergélisol
Hanne Hvidtfeldt Christiansen, UNIS, Réseau thématique UArctic
Donald L. Forbes, chercheur émérite à la Commission géologique du Canada et à l'Institut océanographique de Bedford
Peter Harris, directeur général, GRID-Arendal
Andrea Hinwood, scientifique en chef, PNUE
Emily Jenkins, professeur à l'université de Saskatchewan (pages 104-105)
Lorna Little, GRID-Arendal
Miles Macmillan-Lawler, scientifique en chef, GRID-Arendal
Merritt Turetsky, Professeur, Université du Colorado
Pages 10-11, 18-19, 32-33, 46-51, 54-55, 60-61, 64-65, 98-99 et 102-105 révisées anonymement par le secrétariat d'AMAP.

L'Atlas du pergélisol arctique a été rédigé et édité par GRID-Arendal en collaboration avec tous les partenaires du projet NUNATARYUK, des scientifiques et des chercheurs en début de carrière. Il présente les connaissances les plus récentes sur le pergélisol et l'impact de la fonte du pergélisol sur les établissements humains dans l'Arctique.

L'atlas du pergélisol arctique est un produit clé du projet NUNATARYUK. NUNATARYUK est un projet international de recherche sur le pergélisol composé de 26 partenaires de 14 pays qui travaillent ensemble pour comprendre comment le dégel du pergélisol sur terre, le long des côtes et sous la mer modifie le climat mondial et la vie des habitants de l'Arctique.

Les éditeurs souhaitent remercier les personnes suivantes pour leur précieuse contribution : Arne Aalberg, Marcel Babin, Daniel Baptista, Annett Bartsch, Clément Bertin, Kerstin Brembach, Lisa Bröder, João Canário, Nitin Chaudhary, Bernardo da Costa, Natalia Doloisio, Jade Falardeau, Frank Fell, Vincent Le Fouest, Pedro Freitas, Mathias Göckede, Rafael Gonçalves-Araujo, Gustav Grimstad, Timothy E. Heleniak, Knut Vilhelm Høyland, Jón Haukur Ingimundarson, Konstantin Klein, Rachele Lodi, Victoria Martin, Carla Mora, Georg Pointner, Olga Povoroznyuk, Sandra Raab, Andreas Richter, Torsten Sachs, Niklaas Schmidt, George Tanski, Jean-Paul Vanderlinden, Julia Wagner, Henrike Walther, Birgit Wild, Stiig Wilkenskeld, Dustin Whalen et Alberto Zocchi.

Ce projet est financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention n° 773421.

En mai 2022, trois membres du comité consultatif pour la cartographie et la conception se sont réunis dans les bureaux de GRID-Arendal pour travailler intensivement sur toutes les cartes et tous les graphiques et pour discuter des questions de mise en page et de conception pendant une semaine. Leurs idées et leur aide ont été d'une importance inestimable pour la qualité de cette publication.

Nous tenons à remercier l'IASC et l'IPA pour le soutien financier qu'ils nous ont apporté.

NUNATARYUK Partners

PLEINS FEUX SUR LES ARTISTES

Olga Borjon-Privé (Oluko)

Je suis née et j'ai grandi dans la péninsule de Taïmyr, située dans la partie arctique de la Sibérie. Ma mère était enseignante de profession et artiste dans l'âme, et mon père adorait dessiner. C'est grâce à lui que j'ai pris un crayon et que j'ai commencé à dessiner des personnages que j'avais inventés ou que j'avais lus dans des livres.

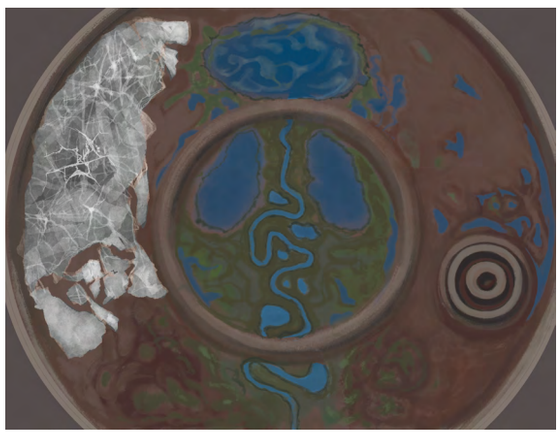
J'ai étudié à l'école des arts de Norilsk et à l'université d'État de Saint-Pétersbourg, où j'ai obtenu un diplôme d'artiste et un diplôme de professeur d'arts décoratifs et appliqués. J'ai travaillé pendant trois ans à la Maison de la créativité populaire de Taïmyr et pendant dix ans en tant qu'enseignante à l'École des arts de Norilsk.

J'utilise différents matériaux et techniques pour créer mes œuvres. Lorsque je peins, j'utilise de l'acrylique. Pour les travaux graphiques, je choisis de l'encre, de l'aquarelle et des matériaux doux comme le pastel ou le fusain. Pour les illustrations de l'atlas du pergélisol arctique, j'ai utilisé une tablette graphique, qui m'a permis d'obtenir une grande variété d'effets grâce à une large sélection de pinceaux. Je m'inspire de l'art populaire traditionnel, du folklore, de l'histoire et des gens que je rencontre. Je suis également inspirée par la nature : les paysages, les textures et le monde animal.

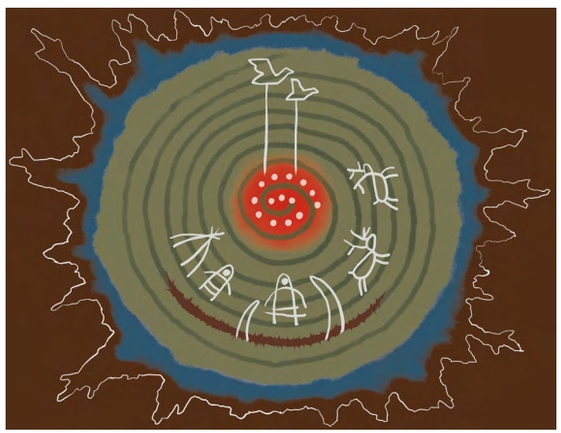
Dès le début de ce projet, j'ai travaillé avec beaucoup d'enthousiasme pour créer ces illustrations. Bien que les personnes représentées dans l'atlas viennent de différentes régions de l'Arctique, je comprenais parfaitement leurs problèmes et leurs sentiments. Le thème du pergélisol nous est commun, à nous qui vivons ou sommes nés dans cette région. Le pergélisol fait partie intégrante de mon pays. Pour mon peuple, le sol est comme une peau de cerf, les arbres et les plantes comme des poils, et les gens comme des insectes.

Au fur et à mesure que j'apprenais les histoires d'autres personnes qui subissent des changements environnementaux, j'ai été de plus en plus inspirée et j'ai compris à quel point il était important de ne pas rester silencieux à ce sujet. Je voulais que mes illustrations ne parlent pas seulement des problèmes, mais qu'elles parlent aussi aux lecteurs du lieu ou de la culture des personnes qui vivent dans ces régions. En étudiant les lieux, les personnes et les traditions mentionnés dans les textes, chaque illustration est devenue une intrigue indépendante.

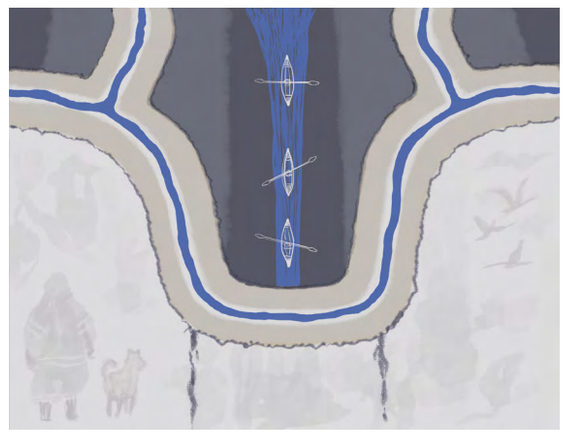
Facebook : Olga Borjon-Privé (Porotova)
Instagram : olukodolgan



Les scientifiques utilisent des cartes pour évaluer les conséquences du dégel du pergélisol et des activités humaines. La menace pour l'environnement se cache également dans les décharges issues des industries humaines antérieures : par exemple, les conteneurs qui contenaient des carburants et des lubrifiants commencent à s'effondrer. J'ai représenté la toundra en taches sur fond de surface rouillée d'un baril de pétrole. De nombreux lacs sont représentés comme des organes humains, et la nature comme un organisme vivant.



Cette illustration est inscrite dans un cercle, sous la forme d'un calendrier traditionnel iakoute, que j'ai pris comme base pour créer la trame. Les éléments de la composition sont situés autour du centre, la couleur rouge symbolisant le soleil. Le changement climatique entraîne des modifications du mode de vie traditionnel des populations : le nombre de pêcheurs et de chasseurs diminue, et de plus en plus de personnes collectent des défenses de mammouth. Dans les cultures du nord et de l'est de la Sibérie, le mammouth a longtemps été associé à des esprits maléfiques ou forts qui avertissent du danger.



Cette illustration s'inspire d'une parka traditionnelle inuite. Ses lignes et ses formes douces m'ont suggéré un contour dans lequel j'ai pu représenter les principaux éléments de la composition. J'ai imaginé une carte sur laquelle j'ai placé des montagnes, des rivières, des bateaux de pêche, des routes, ainsi que les silhouettes d'un homme avec un chien et des oiseaux. C'est une partie de la vie des habitants d'Aklavik - leurs activités, leur lieu. Avec le réchauffement, le pergélisol recule, exposant ses points de pression, d'abord à travers l'état des infrastructures, puis en affectant le mode de vie de ses habitants.



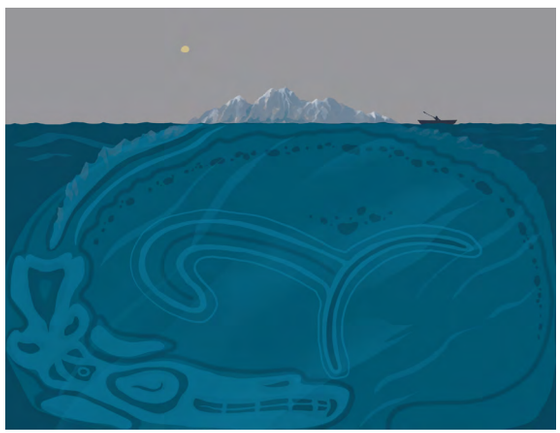
Le dégel du pergélisol dû au réchauffement climatique est un changement grave qui inquiète les habitants de l'Arctique, car il affecte leur mode de vie et le met en péril. Ce dégel se produit progressivement et, comme le pergélisol est souterrain, il n'est pas très visible. Cependant, la fonte des glaciers montre directement le processus de changement climatique sur Terre. Dans l'illustration, j'ai essayé de montrer la beauté de la nature sur fond de glaciers, qui font partie intégrante du paysage arctique.



L'accident survenu près de Norilsk a servi de trame principale à la création de cette illustration. J'ai dessiné un paysage de toundra au printemps, dans lequel j'ai imaginé une rivière sous la forme d'un renne penché. Cette rivière est représentée avec un produit pétrolier qui s'y est infiltré à la suite d'un accident, et la rivière-renne serpente donc en souffrant de tourments. J'ai travaillé pendant de nombreuses années à Norilsk. Avec la tristesse au cœur, je comprends que cette tragédie aura de graves conséquences sur l'ensemble de l'écosystème de ma terre natale et sur la santé alimentaire de mon peuple.



Cette illustration décrit la situation dans laquelle, en raison du réchauffement climatique, l'eau occupe de plus en plus d'espace et pousse les gens à quitter leur maison. Au centre de la composition, un homme contemple la maison qu'il a perdue. Le reflet du ciel sur l'eau dans la silhouette de la maison correspond à la réflexion de l'homme sur ses souvenirs de l'endroit où il a vécu.



« J'ai été surprise par la diversité du pergélisol. C'est une sorte de créature vivante, qui respire et qui bouge. » nous dit Suzanne C'est devenu la trame principale de mon illustration. La philosophie des populations locales, dont le message principal est de vivre en harmonie avec le monde environnant, nous montre que le pergélisol est la base de la vie dans l'Arctique. J'aimerais montrer cette idée d'unité de l'humanité avec la nature et combien nous en dépendons.



Les éléments de cette illustration sont disposés de manière à représenter un inuksuk. Un inuksuk est un monument traditionnel inuit en pierre, utilisé comme point de repère pour les voyageurs et installé dans les lieux sacrés et les sites funéraires. Le pergélisol est représenté ici sous la forme d'un bloc de glace : une base fragile pour la vie des habitants de la région. La lune et les étoiles, sur fond de ciel polaire, observent en silence les changements qui ont déjà commencé.



La déclaration d'Ingrid sur les bâtiments de Ny-Ålesund m'a inspiré cette illustration. Ils ouvrent une fenêtre sur le passé et nous parlent des espoirs et de la persévérance des gens. C'est pourquoi mon élément principal est un motif sur une fenêtre gelée sous la forme d'une volée d'oiseaux, symbole d'un espoir éternel. J'ai représenté des maisons de charbonniers à l'arrière-plan pour montrer que Ny-Ålesund était une colonie minière et que, malgré l'arrêt de l'exploitation du charbon, les maisons qui s'y trouvent sont conservées en souvenir de cette époque.

PLEINS FEUX SUR LES ARTISTES

Katie Orlinsky

La photographe Katie Orlinsky a passé les quinze dernières années à couvrir des sujets d'actualité et à réaliser des reportages dans le monde entier pour des publications telles que National Geographic, The New York Times et The New Yorker. Au cours des huit dernières années, la majorité de son travail a porté sur la façon dont la crise climatique remet en question et transforme les relations entre les hommes, les animaux et la terre. Les photographies de Katie ont été récompensées par World Press Photo, Pictures of the Year International, Alexia Foundation, Visa Pour L'image, PDN et l'Art Director's Club. Elle est titulaire d'une licence en sciences politiques du Colorado College et d'un master en journalisme de l'université de Columbia. Katie enseigne en tant que professeure invitée à l'université de New York et à l'université d'Alaska Fairbanks.

www.katieorlinskyphoto.com
@Katie Orlinsky



Après une chasse fructueuse, un jeune Iñupiat fait une pause pour transporter la viande de baleine dans la cave à glace de sa famille à Utqiagvik, en Alaska. Les caves à glace sont de grands congélateurs souterrains, souvent vieux de plusieurs générations, creusés profondément dans le pergélisol. Cependant, avec le dégel du pergélisol, les caves peuvent devenir inutilisables, soit parce qu'elles sont physiquement endommagées, soit parce qu'elles se réchauffent au point qu'il n'est plus possible d'y stocker de la nourriture en toute sécurité.



Le dégel du pergélisol sous la surface de la terre libère du méthane dans les lacs de l'Arctique, provoquant la formation de bulles de gaz dans l'eau gelée. Si le gaz est libéré, une petite flamme peut créer un bref incendie à la surface du lac, comme l'ont démontré Melanie Engram et Allen Bondo sur un étang près du lac Smith à Fairbanks, en Alaska.



Le cratère de Batagaika, près de la ville sibérienne de Batagaï en Russie, a été surnommé « le cratère de l'enfer » ou « la porte des enfers ». Profonde de plus de 90 mètres et longue d'un kilomètre, cette dépression thermokarstique est l'une des plus grandes au monde. Elle renferme plus de 200 000 ans d'histoire et d'informations climatiques. Elle a commencé à se former dans les années 1960, lorsque le pergélisol sous la zone a commencé à dégeler après l'abattage des forêts avoisinantes.



Le village de Newtok, en Alaska, s'enfonce à mesure que le pergélisol dégèle. Lors d'une chasse aux oiseaux en été, quatre garçons yupik traversent une passerelle inondée. Newtok est la première communauté d'Alaska à commencer à se déplacer en raison du changement climatique, ouvrant ainsi la voie à un processus que de nombreux autres villages d'Alaska pourraient bientôt connaître.



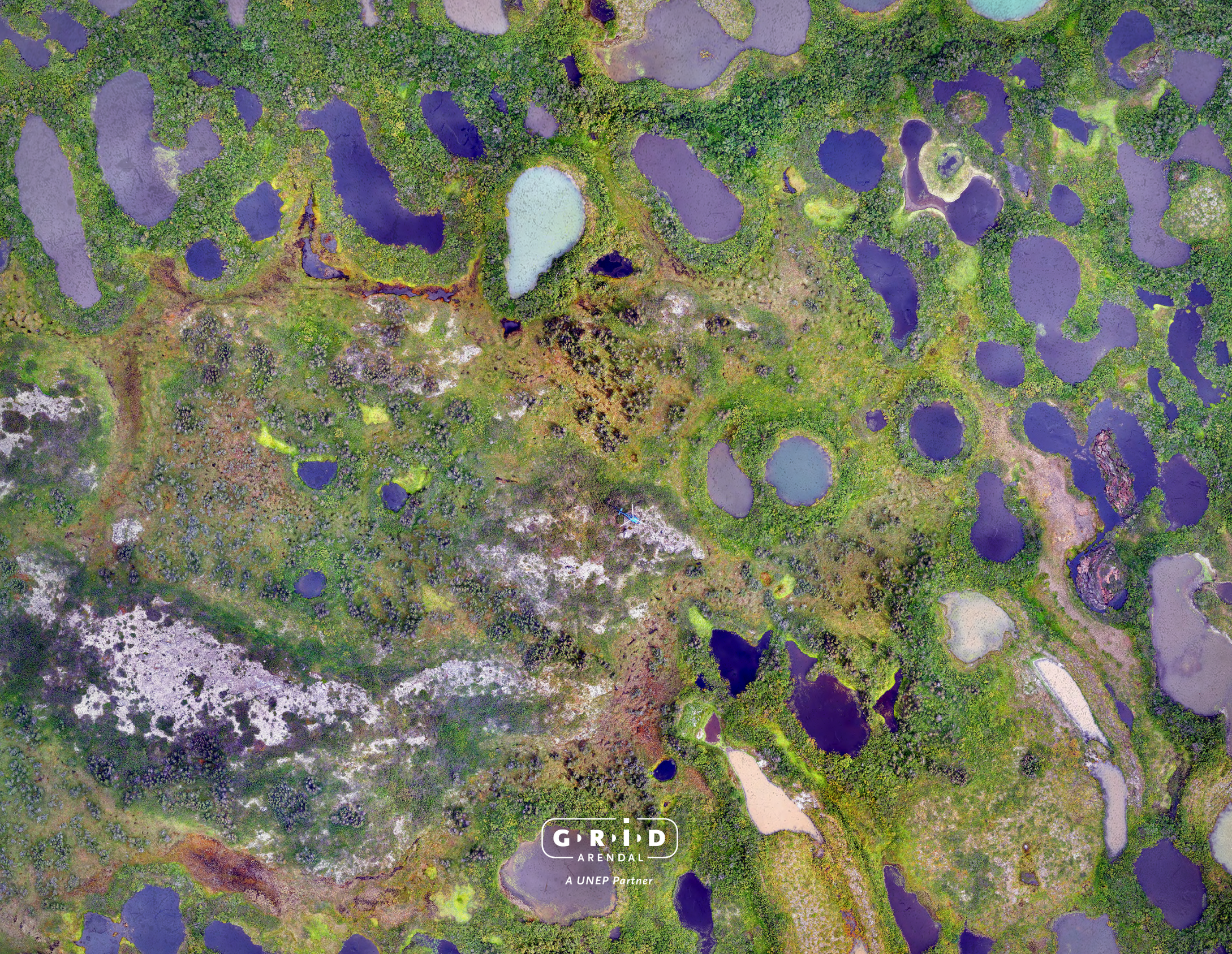
Construit par le Corps des ingénieurs de l'armée américaine dans les années 1960, ce tunnel près de Fairbanks, en Alaska, est aujourd'hui utilisé pour la recherche sur le pergélisol. Les parois du tunnel, longues de 110 mètres, contiennent de la terre, des fossiles, des restes d'animaux et de plantes congelés, du limon, du sable, du gravier, de la roche mère et des milliers d'années d'histoire.



Des animaux paissent dans la région d'Uvs, en Mongolie. Au cours de l'hiver 2017-2018, des conditions météorologiques extrêmes dans la région ont entraîné une catastrophe naturelle connue localement sous le nom de dzud. Des vents glaciaux venus de Sibérie ont fait chuter la température en dessous de -50 °C. Plus d'un million d'animaux ont gelé ou sont morts de faim parce qu'ils n'ont pas pu brouter. Les étés devenant plus chauds et plus secs, il y a moins de foin disponible pour que le bétail prenne le poids nécessaire pour survivre aux hivers rigoureux.



La rivière Alatna, en Alaska. La limite forestière est la limite la plus septentrionale où les arbres peuvent pousser. Sous l'effet du changement climatique, elle se déplace vers le nord, transformant le paysage de la toundra et introduisant dans l'Arctique de nouvelles espèces animales telles que le castor, l'élan et le lièvre d'Amérique. Les scientifiques commencent à peine à comprendre ce que cela signifie pour l'avenir, en particulier l'impact que ces changements de paysage pourraient avoir sur l'accélération du dégel du pergélisol.


G·R·I·D
ARENDAL
A UNEP Partner