

immunitaire face aux invasions bactériennes, ces mêmes variations génétiques devraient se traduire par des différences dans la façon dont les gens combattent les infections. Un récepteur de l'amertume qui produit une forte réponse protégerait mieux contre les infections qu'un récepteur déclenchant une faible réponse, lequel accroîtrait la susceptibilité aux maladies infectieuses.

Nous avons commencé à tester cette hypothèse sur des personnes et nos premiers résultats suggèrent qu'elle est correcte. Les millions de patients atteints de rhinosinusite chronique constituent une population tout indiquée pour ce test, d'autant plus que ce groupe a besoin d'aide. Lorsqu'elles répondent à un questionnaire sur leur qualité de vie, les personnes souffrant de rhinosinusite obtiennent des scores bien plus mauvais que les patients atteints de plusieurs maladies pulmonaires ou cardiaques. De plus, elles ont tendance à développer de graves infections pulmonaires ou d'autres pathologies des voies respiratoires telles que l'asthme.

Nous avons examiné des cultures microbiennes produites à partir de prélèvements effectués sur des personnes atteintes de sinusite chronique. Ces cultures ont révélé que si les super-goûteurs ne sont pas immunisés contre les rhinosinusites, ils souffrent beaucoup moins que les non-goûteurs d'infections nasales dues à des bactéries à Gram négatif. Cela paraît logique, car celles-ci produisent des AHL, ces molécules qui, en activant les récepteurs, conduisent les cellules à libérer du monoxyde d'azote, létal pour les microbes. En revanche, contre des bactéries ne produisant pas ces molécules, ce mécanisme de défense ne peut fonctionner.

D'autres essais cliniques sont aussi en faveur d'un rôle des récepteurs T2R38 dans la sensibilité aux sinusites. Deux études menées dans notre groupe montrent que les personnes dotées de deux copies du variant super-goûteur du gène codant T2R38 sont moins susceptibles de contracter de graves rhinosinusites que les patients ayant deux copies du variant non-goûteur, ou même que ceux portant une copie de chaque variant. Une étude de l'otorhinolaryngologiste Martin Desrosiers, du Centre hospitalier de l'université de Montréal, et de ses collègues a par ailleurs vérifié que le variant non-goûteur est plus souvent détecté chez les patients atteints d'une rhinosinusite chronique que chez les personnes en bonne

santé. Ces chercheurs ont de plus montré que la gravité de la rhinosinusite est associée à des variants de deux autres types de récepteurs T2R, nommés T2R14 et T2R49.

Dans les organes autres que le nez, les liens entre récepteurs du goût et immunité commencent à apparaître. En 2014, une étude a montré qu'en présence de bactéries *Escherichia coli* pathogènes, les cellules chimiosensorielles des voies urinaires stimulent la prostate *via* des récepteurs T2R, ce qui libère l'urine. S'agirait-il d'un mécanisme d'expulsion des bactéries? Une autre étude récente a montré que les globules blancs – des acteurs clés du système immunitaire – détectent aussi les molécules AHL des bactéries du genre *Pseudomonas* à l'aide de récepteurs T2R38.

La piste du chou de Bruxelles

À présent, nous examinons si des composés chimiques qui activent les récepteurs T2R fonctionneraient comme médicaments contre la rhinosinusite en déclenchant une réponse immunitaire plus forte susceptible d'éliminer les bactéries. Ainsi, les nombreux composés amers présents dans la nourriture pourraient avoir des fonctions thérapeutiques. Citons les humulones et les lupulones – des acides présents dans la bière à base de houblon –, les isothiocyanates des légumes verts tels que les choux de Bruxelles, et les substances amères des agrumes, telle la limonine. Une étude a notamment montré que l'absinthine, le principe amer de l'absinthe, stimule les récepteurs T2R des cellules chimiosensorielles solitaires. Au laboratoire, nous travaillons sur plusieurs mélanges qui pourraient avoir une action thérapeutique. De nouveaux traitements à base de composés amers permettront peut-être un jour de combattre les infections sans recourir aux antibiotiques.

Le goût ou l'analyse génétique des récepteurs T2R pourraient aussi être utilisés pour prédire la sensibilité aux infections. Les variations naturelles au sein de ces récepteurs gustatifs aideraient à répondre à l'éternelle question : pourquoi certaines personnes sont-elles sujettes aux infections respiratoires tandis que d'autres semblent ne jamais tomber malades? Élucider le problème grâce aux récepteurs de l'amertume serait une victoire particulièrement... savoureuse. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

R. J. Lee et N. A. Cohen, **Taste receptors in innate immunity**, *Cellular and Molecular Life Sciences*, vol. 72(2), pp. 217-236, 2015.

R. J. Lee et al., **Bitter and sweet taste receptors regulate human upper respiratory innate immunity**, *Journal of Clinical Investigation*, vol. 124(3), pp. 1393-1405, 2014.

N. D. Adappa et al., **The bitter taste receptor T2R38 is an independent risk factor for chronic rhinosinusitis requiring sinus surgery**, *International Forum of Allergy & Rhinology*, vol. 4(1), pp. 3-7, 2014.

S. C. Kinnamon, **Taste receptor signaling – From tongues to lungs**, *Acta Physiologica*, vol. 204(2), pp. 158-168, 2012.

Pergélisol et climat

Les chiffres

de la menace



Le dégel du sol arctique va vraisemblablement accélérer le réchauffement climatique pendant le XXI^e siècle. Un réseau mondial de chercheurs s'active afin d'évaluer à quel point.

Edward Schuur

LA TOUNDRA, savane arctique, abonde en terres humides et en sols gelés remplis de matière organique, dont le dégel accélérera probablement le réchauffement climatique.

L'ESSENTIEL

■ Les pergélisols sont des sols gelés en permanence. La matière organique qui s'y est accumulée au fil des millénaires n'a jamais pu se décomposer totalement.

■ Avec le dégel de plus en plus fréquent de ces sols en Arctique, la matière organique se décompose et émet des gaz à effet de serre.

■ Un réseau international de chercheurs a notamment pour objectif de quantifier ces émissions, qui vont amplifier le réchauffement climatique dû à l'emploi des combustibles fossiles.

© Carl Johnson/Design Pics - Getty Images

Début avril en Alaska, par une belle journée froide. Le bloc de 20 kilogrammes de neige et de glace durcie m'échappe et atterrit dans un grand craquement au fond de la fosse que je suis en train de creuser. À genou sur le bord de la tranchée, je me redresse pour reprendre mon souffle et étirer mes reins endoloris, que renforce une ceinture lombaire. Avec cinq collègues, je suis en train d'extraire des tonnes de neige au pied de la quatrième des barrières à neige que nous avons installées sur une colline. Nous évacuons la neige extraite sur des traîneaux.

En association avec d'autres, notre équipe conduit en effet des essais sur une parcelle expérimentale située aux marges du parc national Denali, en plein centre de l'Alaska. Il s'agit de réchauffer un peu le sol pendant l'hiver, afin d'étudier les éventuels effets du changement climatique dans la région. Pour ce faire, nous nous sommes contentés de construire des barrières de 1,5 mètre de haut et longues de 8 mètres sur une colline aux pentes douces de la toundra. La neige s'y est accumulée, protégeant notre sol expérimental des températures négatives extrêmes de l'air hivernal. Le printemps est arrivé et nous voulons maintenant étudier le dégel du sol de notre station expérimentale dans les mêmes conditions que celles que connaissent les sols de la toundra environnante. Il nous faut donc éviter en particulier que la fonte des congères accumulés au pied des barrières ne le sature en eau. Nous évacuons donc la neige des congères. Dur travail !

L'objectif du Réseau mondial de suivi terrestre du pergélisol (*Global Terrestrial Network for Permafrost*), dont fait partie notre laboratoire, est de mieux appréhender l'évolution des immenses surfaces de sols gelés en permanence, type de sol nommé pergélisol ou permafrost. En gardant notre sol moins froid en hiver, son dégel est plus

précoce et plus étendu en été. C'est exactement ce à quoi on s'attend avec l'augmentation des températures, qui est deux fois plus rapide dans les écosystèmes arctiques et boréaux que sur le reste du globe.

Un pergélisol contient de la roche, de la terre gelée et de la glace, de sorte que lorsqu'il se réchauffe, il dégèle plutôt qu'il ne fond. Tel un hamburger retiré du congélateur, il se ramollit sans pour autant se liquéfier. Ce processus réactive les microorganismes qu'il contient, qui se mettent à décomposer les résidus de plantes et d'animaux accumulés dans la terre gelée au cours des millénaires. Cela libère du dioxyde de carbone (CO₂) et du méthane (CH₄).

Les sols des régions qui entourent le pôle Nord contiennent tant de matière organique que la transformation de seulement une fraction de cette masse en gaz à effet de serre suffirait à accélérer considérablement le réchauffement climatique. Les essais que nous menons en Alaska constituent une partie importante de l'ensemble des recherches coordonnées à travers le monde afin de jauger l'importance de cet effet. Or nous commençons à en savoir assez pour faire des estimations fiables.

Estimer le dégel du pergélisol en Arctique

Comment quantifier le dégel du pergélisol et ses conséquences ? Il faut commencer par déterminer la masse de sol susceptible de dégeler, estimer la vitesse de son dégel et évaluer l'impact des émissions de carbone associées sur le changement climatique. Cela implique la prise en compte d'une surface énorme : 16,7 millions de kilomètres carrés de l'hémisphère Nord (l'hémisphère Sud est couvert d'océans aux hautes latitudes et comporte donc peu de pergélisols), soit presque un quart de la surface des terres



Sur mention contraire, les photos sont de Brian Adams



émergées non recouvertes de glace. Or l'épaisseur d'un sol gelé peut atteindre des dizaines, voire des centaines de mètres...

Même si les satellites ou d'autres dispositifs de télédétection peuvent suivre l'évolution des calottes glaciaires – celles du Groenland par exemple –, il n'existe aucune méthode de suivi à distance des régions de pergélisol. Depuis des années, les chercheurs surveillent des capteurs installés en divers endroits, mais ils n'ont pas encore pu recueillir assez de données. Aussi, nous continuons à installer des capteurs. Le Réseau mondial de suivi terrestre du pergélisol exploite ainsi plus de un millier de forages équipés d'instruments afin de surveiller l'évolution de la température dans les premiers mètres du sol et plus en profondeur.

Les résultats de ce suivi suggèrent que le pergélisol s'est petit à petit réchauffé au cours des dernières décennies, atteignant en de nombreux endroits des records en 2014 et en 2015. Les augmentations les plus spectaculaires se sont produites là où les températures du sol étaient très basses depuis longtemps, c'est-à-dire comprises en permanence entre -10°C et -5°C . Nous avons aussi observé des augmentations de température dans les pergélisols plus proches du point de congélation (0°C), dont les températures sont comprises entre -2°C et 0°C , là où une variation de 1 degré seulement peut avoir un impact important.

DEUX CHERCHEURS prélèvent une carotte de sol arctique dégelé à la station de recherche d'Eight Miles Lake, en Alaska, en septembre 2016 (ci-dessus). La terre ainsi recueillie est d'une couleur sombre, car elle est très chargée en matière organique (ci-dessus à droite). Des capteurs à infrarouges placés au sein de chambres à multiples réflexions mesurent les émissions de dioxyde de carbone par le sol (page suivante, à gauche); une chercheuse enregistre les données ainsi produites (page suivante, à droite).

■ L'AUTEUR



Edward SCHUUR est professeur d'écologie à l'université de l'Arizona du Nord, aux États-Unis, et chercheur principal du réseau international Permafrost Carbon Network.

Aux quelques endroits où la température du pergélisol est tout juste inférieure à 0°C , la couche active – le sol proche de la surface qui dégèle pendant l'été et regèle l'hiver – s'épaissit. La compilation des données de température provenant du monde entier donne une bonne vision d'ensemble des changements de la température du sol en Arctique.

50 kilogrammes de carbone par mètre cube

La quantité de pergélisol susceptible de dégeler n'est qu'une partie du calcul à effectuer. Nous avons aussi besoin de savoir combien de matière organique contient le sol qui se ramollit. Afin de le déterminer, au printemps dernier nous avons prélevé dans le sol de notre station expérimentale d'Eight Mile Lake des carottes de terre longues de 1,5 mètre – comme nous l'avions déjà fait à plusieurs reprises depuis le lancement de notre projet il y a dix ans.

Nos mesures et celles d'autres équipes montrent que chaque premier mètre cube de sol de toundra contient environ 50 kilogrammes de carbone sous forme de matière organique. Ce type de carbone, qui provient des organismes végétaux ou animaux partiellement décomposés, s'oppose au carbone inorganique lié à la roche, peu susceptible d'être affecté par les changements



de température. Cette quantité représente environ 5 fois celles contenues dans les sols non gelés et 100 fois celles stockées dans les arbustes et autres végétaux qui arrivent à vivre en Arctique.

Au total, on estime que les pergélisols de l'hémisphère Nord, qui ne couvrent que 15 % des sols de la planète, contiennent entre 1 330 milliards et 1 580 milliards de tonnes de carbone organique. Celui-ci peut se trouver à des dizaines de mètres de profondeur dans le sol. Si l'on se limite aux trois premiers mètres, le carbone des pergélisols représente la moitié de la masse totale de carbone contenue dans les trois premiers mètres de sol de l'ensemble des terres émergées et à près du double de la masse du carbone atmosphérique (essentiellement sous forme de CO_2 et CH_4).

Afin de préciser encore leurs idées, les chercheurs ont entrepris aussi de déterminer les masses de carbone organique où cela n'a pas encore été fait, notamment dans les sols marins peu profonds bordant certaines côtes arctiques. Ces pergélisols sous-marins se dégradent lentement à mesure que l'eau de mer les pénètre. Nous ignorons à ce stade combien de carbone organique ils pourraient contenir. Les épaisses couches sédimentaires des vastes deltas des fleuves arctiques contiennent aussi beaucoup de carbone, mais cela n'a été mesuré que sur quelques sites. Pour le moment, la meilleure estimation

que nous puissions donner est qu'environ 400 milliards de tonnes de carbone organique non pris en compte à ce stade pourraient se trouver dans ces divers endroits mal explorés.

Étant donné les masses énormes de carbone organique contenues dans le pergélisol, il semble plausible que son dégel libérera d'énormes volumes de gaz à effet de serre. Comment les quantifier ? Il faut pour cela répondre à trois questions clés.

Combien de gaz émis, et lesquels ?

Premièrement, quelle est la proportion de carbone qui sera transformée en gaz à effet de serre ? Les microorganismes du sol ne métabolisent et ne libèrent qu'une partie du carbone organique du sol. Une partie reste donc dans le sol, soit parce qu'elle est inaccessible, soit parce qu'elle est difficilement métabolisable par les microbes.

Deuxièmement, à quelle vitesse l'activité microbienne libère-t-elle des gaz ? Du carbone se décomposant rapidement peut se retrouver dans l'atmosphère en moins d'une année après le dégel. Toutefois, la plus grande partie du carbone, celui qui fait partie de matières organiques seulement à moitié décomposées, ne sera vraisemblablement libérée que bien plus tard, à mesure de l'avance du travail microbien au cours des décennies.

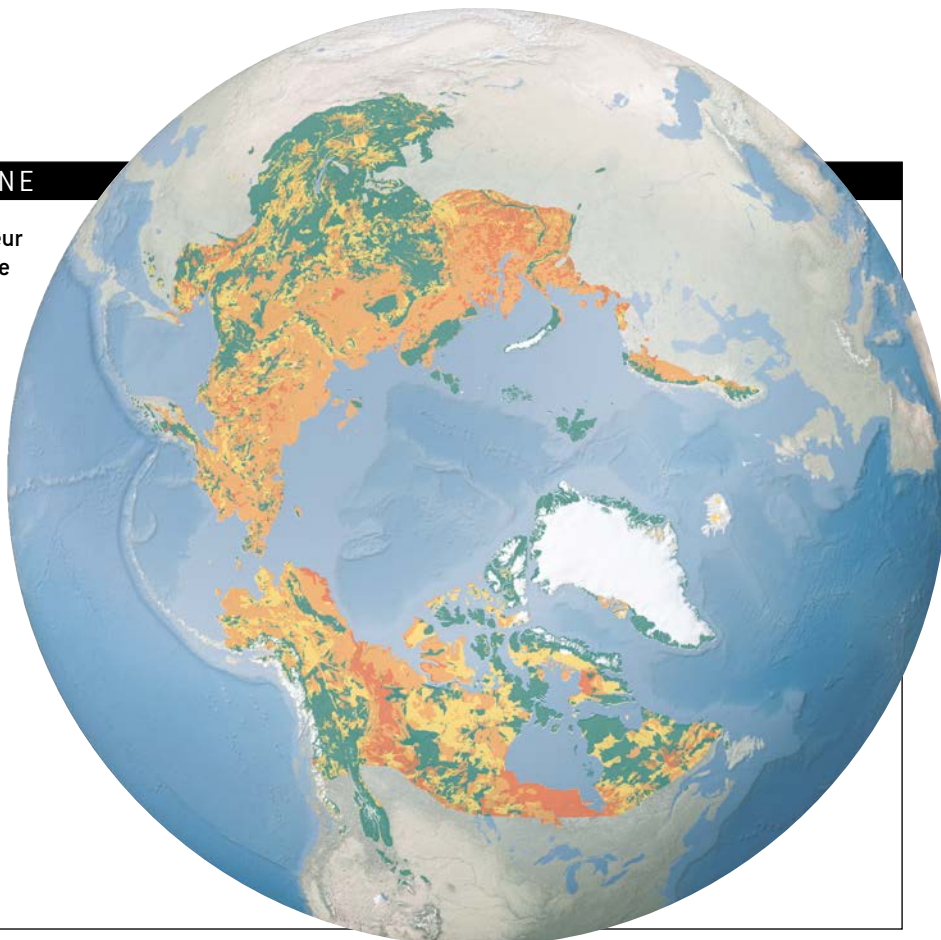
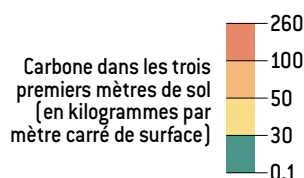
Troisièmement, quels gaz à effet de serre les microbes libéreront-ils ? En d'autres termes, quelles seront les proportions de dioxyde de carbone et de méthane, proportions dont dépendra le réchauffement dû à ces gaz ? Les sols saturés d'eau et pauvres en oxygène, voire anaérobies (sans dioxygène), telles les tourbières, produisent en effet beaucoup plus de méthane que de dioxyde de carbone. Or à masse égale et à l'échelle d'un siècle, le méthane contribue 33 fois plus à l'effet de serre que le dioxyde de carbone.

Il nous faut donc suivre de près la libération de gaz par le sol, ce que nous faisons en entourant des sites tels qu'Eight Mile Lake d'analyseurs de gaz à infrarouges. Souvent placés au sein de chambres à réflexions multiples (*caisses blanches visibles sur la photographie ci-dessus*) afin d'améliorer la précision des mesures, ces analyseurs permettent de suivre les concentrations de gaz à effet de serre dans l'air sur des secondes, des jours, des saisons ou des années.

Il s'est révélé que la toundra d'Eight Mile Lake perd plus de carbone dans l'atmosphère qu'elle n'en absorbe. Certes, le réchauffement du sol dû à l'accumulation de neige le long des barrières a stimulé la croissance des plantes. Celles-ci ont donc absorbé davantage de dioxyde de carbone dans l'air. Toutefois, ce réchauffement a aussi amené les microorganismes du sol à décomposer davantage le carbone

UN RÉSERVOIR DE CARBONE

Les trois premiers mètres d'épaisseur de la bande de sols gelés qui entoure le pôle Nord (en couleurs) contiennent environ 1 035 milliards de tonnes de carbone organique, souvent en très fortes concentrations (régions en orange foncé). Si ces pergélisols devaient dégeler, la transformation d'une partie de ce carbone en gaz à effet de serre – dioxyde de carbone et méthane essentiellement – amplifiera notablement le réchauffement climatique.



organique souterrain. Pendant la saison estivale, la croissance végétale supplémentaire compense complètement la libération additionnelle de carbone à partir du sol, mais pas pendant les longs mois d'automne et d'hiver. La vie végétative est alors stoppée, mais pas la vie microbienne. Résultat : à l'échelle de l'année, la toundra émet plus de carbone qu'elle n'en absorbe.

Afin de nous faire une idée de l'émission mondiale des pergélisols, des chercheurs du monde entier ont joint leurs efforts au sein du Réseau carbone du pergélisol (*Permafrost Carbon Network*). Nous autres chercheurs de terrain en Arctique sommes en effet comparables à des aveugles qui touchent un éléphant et qui, pour avoir une chance de pouvoir se représenter l'animal, sont obligés de combiner leurs observations. Chacun de nous détient des informations importantes et uniques, mais tant que nous ne les avons pas rassemblées, nous ne pouvons espérer acquérir une connaissance fiable de la nature et de l'ampleur du phénomène de libération du carbone enfermé dans le pergélisol.

En plus de rassembler des résultats provenant de partout sur la planète, notre réseau élabore aussi des rapports de synthèse sur

le rôle du pergélisol dans le réchauffement climatique à destination des décideurs, des médias et du grand public.

Les sols saturés d'eau émettent du méthane

L'un de nos rapports récents répond ainsi à la question des proportions de dioxyde de carbone et de méthane dans les émissions. Sous des conditions aérobies, c'est-à-dire quand le sol est sec, les microbes du sol libèrent essentiellement du dioxyde de carbone. En revanche, quand les conditions sont anaérobies, comme c'est le cas dans les marais et les tourbières, ces microorganismes libèrent aussi du méthane en plus du dioxyde de carbone. Christina Schädel, une collègue de l'université de l'Arizona du Nord et qui est aussi l'une des figures clés du Réseau carbone du pergélisol, a étudié comment les émissions de l'un et l'autre gaz se combinent, de façon à mieux apprécier l'impact sur le climat des mélanges de gaz à effet de serre émis par les sols dégelés saturés d'eau.

Christina Schädel a privilégié une approche expérimentale : elle a étudié en laboratoire le comportement de blocs de sol gelés amenés tels quels puis réchauffés

au sein d'enceintes de verre équipées d'instruments. Ces enceintes étant fermées, on peut mesurer avec précision les quantités de dioxyde de carbone et de méthane émises. En compilant les données recueillies lors de ces tests et d'autres dans le monde, elle a pu montrer que, quelles que soient les conditions de dégel – aérobies ou anaérobies –, le dioxyde de carbone prédomine. Curieusement, les sols secs, où le dioxyde de carbone est produit en conditions aérobies, contribuent deux fois plus à l'effet de serre que les sols gorgés d'eau, où ce même gaz et du méthane sont produits en conditions anaérobies.

Il s'ensuit que la fonte du pergélisol des terres élevées, bien drainées, aura vraisemblablement un impact climatique bien supérieur à celle d'une surface équivalente de sol imbibé d'eau dans la plaine. Ainsi, bien que le méthane joue aussi un rôle clé dans le bilan à établir, la répartition d'ensemble des hautes terres et des basses terres dans le paysage de l'Arctique est un paramètre clé, qui déterminera de façon significative l'impact de la fonte du pergélisol sur le climat.

En synthétisant les données de terrain et de laboratoire et en combinant ces informations avec des simulations numériques

des futurs scénarios climatiques, le Réseau carbone du pergélisol vient de fournir le résultat suivant : au cours du XXI^e siècle, entre 5 et 15 % du carbone organique du pergélisol est susceptible d'être libéré, majoritairement sous forme de dioxyde de carbone.

La valeur médiane (10 %) de cette fourchette signifierait l'entrée dans l'atmosphère de 130 milliards à 160 milliards de tonnes de carbone supplémentaires par rapport à ce qui est prévu par ailleurs. Si elle est libérée essentiellement sous forme de dioxyde de carbone à un rythme constant pendant un siècle, cette quantité serait comparable à la quantité de carbone libérée dans le monde entier jusqu'ici par la déforestation et par les autres changements d'usage des sols, mais très inférieure aux rejets dus aux combustibles fossiles.

Le dégel accélérera le changement climatique

Le dégel du pergélisol accélérera donc le changement climatique par rapport à ce que l'on prévoyait en se fondant seulement sur les émissions liées aux activités humaines. De plus, les émissions dues à ce dégel se poursuivront sans doute au-delà du XXI^e siècle, et chaque tonne additionnelle de carbone organique libérée par l'Arctique coûtera à la société.

Réduire le dégel du pergélisol par des mesures locales en Arctique n'est pas réaliste. La seule solution est de limiter la combustion des carburants fossiles et à limiter la déforestation. Cela aura pour effet de ralentir le réchauffement global, donc le dégel des terres arctiques, ce qui donnera aux sociétés humaines davantage de temps pour s'adapter.

La fourchette citée plus haut – entre 5 et 15 % du carbone organique du pergélisol transformé en gaz à effet de serre – a été déterminée en 2015. Pour le moment, notre dispositif de recherche sur le pergélisol arctique est trop incomplet pour nous permettre de la réduire. Le déploiement de capteurs supplémentaires est nécessaire.

De nouveaux projets tels que l'Expérience sur écosystème de nouvelle génération (*Next Generation Ecosystem Experiments*) du Département de l'énergie des États-Unis ou encore l'Expérience sur la vulnérabilité arctique ou boréale (*Arctic-Boreal Vulnerability Experiment*) de la Nasa

sont en cours. Ils devraient nous aider à combler nos lacunes en matière de modélisation des écosystèmes et à étendre aux autres régions environnantes les résultats obtenus dans la station expérimentale d'Eight Miles Lake.

Une question importante à éclaircir est celle de la croissance de la végétation qui accompagnera la hausse des températures dans l'Arctique. Cette croissance pourrait-elle contrebalancer la libération de carbone par le pergélisol ? Les dernières simulations suggèrent que l'allongement de la période végétative, la présence de plus de nutriments dans les sols dégelés et l'apparition d'une végétation plus touffue pourraient compenser les émissions de carbone organique par le pergélisol durant le XXI^e siècle. Mais nos mesures à Eight Miles Lake contredisent ce pronostic, puisqu'elles indiquent une émission nette de carbone dans l'atmosphère à l'échelle de l'année.

Il sera aussi essentiel de simuler la façon dont le sol arctique s'affaisse lorsqu'il dégèle. En effet, quand un sol dégèle, la glace qu'il contenait se liquéfie et s'écoule, de sorte que des pans entiers de sol s'effondrent. Ce point n'est actuellement pas pris en compte dans les simulations à grande échelle des interactions entre le carbone du pergélisol et le climat.

Nous avons par exemple observé le phénomène à Eight Miles Lake quand nous y sommes revenus au printemps de 2016 : les chemins de bois que nous avions construits il y a dix ans, nos analyseurs de gaz et nos autres appareils avaient été déformés ou déséquilibrés. Des ondulations et des crevasses avaient envahi le terrain. Nous avons aussi constaté que le dégel avait pénétré le sol plus profondément qu'avant, jusqu'à un mètre de profondeur en certains endroits. Un phénomène que nous n'avions jamais observé.

Ces observations inhabituelles s'ajoutent à nombre de phénomènes inédits dans l'Arctique : un recul record de la banquise, une fonte des neiges précoce dans tout l'hémisphère Nord et une fonte précoce de la couche de glace au Groenland. Ainsi, davantage de sols dégelés sont actuellement en train d'émettre des gaz, phénomène qui va se poursuivre de façon soutenue pendant des décennies. Nul doute qu'il compliquera le défi impressionnant auquel est déjà confrontée l'humanité : freiner le réchauffement climatique. ■



CETTE TOUR INSTRUMENTALE sert à mesurer, tout au long de l'année, les transferts de dioxyde de carbone et de méthane entre le sol et l'atmosphère. Elle permet de faire le bilan des émissions de gaz à effet de serre par l'écosystème de toundra où elle est implantée.

■ BIBLIOGRAPHIE

E. A. G. Schuur *et al.*, **Climate change and the permafrost carbon feedback**, *Nature*, vol. 520, pp. 171-179, 2015.

E. A. G. Schuur *et al.*, **Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change**, *Climatic Change*, vol. 119(2), pp. 359-374, 2013.

E. A. G. Schuur et B. Abbott, **High risk of permafrost thaw**, *Nature*, vol. 480, pp. 32-33, 2011.

K. Walter Anthony, **Méthane : un péril fait surface**, *Pour la Science* n° 390, avril 2010.

Vers une définition quantique du kilogramme

Tim Folger

