

en continu du dioxyde de carbone et d'autres gaz dans l'atmosphère. Le CO₂ réagit avec le silicate de calcium, produisant du carbonate de calcium et du dioxyde de silicium, qui finissent par sédimenter sur le plancher océanique. À mesure que la croûte replonge par subduction dans le manteau, elle entraîne avec elle ces sédiments et réapprovisionne le manteau en carbone, dont une partie retrouve le chemin de l'atmosphère, et ainsi de suite. Ce cycle carbone-silicate fait office de thermostat pour réguler – via l'effet de serre – la température globale de la surface. Sur Terre, il contribue à maintenir les températures propices à l'eau liquide depuis des milliards d'années. De même, la tectonique recycle d'autres minéraux et gaz importants pour la vie, dont, par exemple, le sulfure d'hydrogène qui a pu servir de carburant à la vie avant l'apparition de la photosynthèse.

Terrain de choix

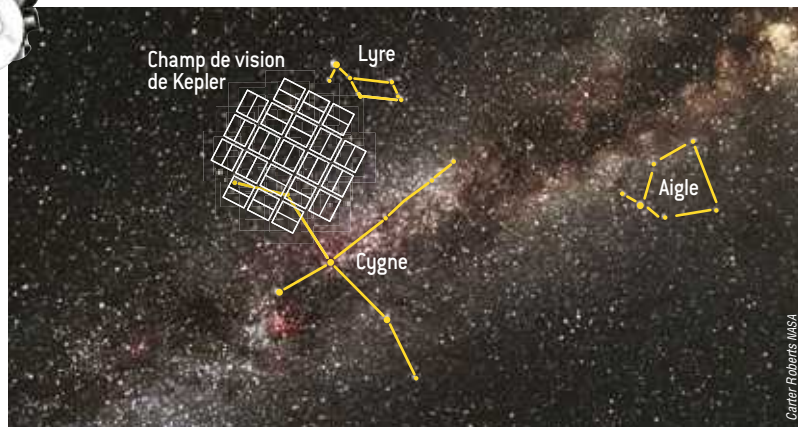
Sur une super-Terre, la durée de formation et la durée de vie des plaques raccourcissent, ce qui rend le cycle carbone-silicate plus rapide et moins sensible aux perturbations. À certains égards donc, les super-Terres pourraient être encore plus hospitalières pour la vie que les planètes de la taille de la Terre. De plus, leurs masses plus importantes ralentiraient la fuite de leur atmosphère et de l'eau dans l'espace. Ce phénomène de fuite est un réel problème pour les planètes plus proches de leur étoile que ne l'est Mars du Soleil.

En comparant la Terre aux modèles de super-Terres de différentes tailles, nous avons ainsi découvert un riche éventail de conditions de type terrestre stable pour des planètes telluriques. C'est cependant une famille où la Terre est reléguée à la marge. Plus petite, elle est plus vulnérable à maints égards. Et dans notre Système solaire, les petites planètes sont plutôt inactives d'un point de vue géologique. Si Vénus a peut-être une faible tectonique, Mars s'est figée très tôt, et ne dégaze aujourd'hui pas assez pour renflouer son atmosphère qui se raréfie. Si la taille de la Terre lui a permis d'échapper à ce sort, cela s'est apparemment joué à peu de chose. Néanmoins, malgré ces indices, on ne peut pas affirmer avec certitude que

FIXER DU REGARD 150 000 ÉTOILES



L'Observatoire spatial *Kepler* de la NASA, qui a été placé en orbite en 2009, est dédié à la recherche de nouvelles planètes. Sa mission est de scruter plus de 150 000 étoiles dans une région du ciel proche de la constellation du Cygne, en mesurant leur luminosité pour repérer les éventuels transits planétaires. Les 42 détecteurs de la caméra de *Kepler*, dont le champ de vision peut couvrir la Lune, ont une résolution totale de 95 mégapixels et peuvent détecter des baisses de luminosité de 0,01 pour cent seulement. Afin de distinguer les signaux véritables du bruit, *Kepler* doit suivre les mêmes étoiles pendant plusieurs années pour enregistrer plusieurs transits. *Kepler* a déjà découvert de nouvelles planètes, mais le meilleur est à venir !



la tectonique des plaques soit indispensable à la vie.

À quoi ressembleraient les paysages sur une super-Terre rocheuse (et non couverte d'un océan global) ? Au premier coup d'œil, ils ne seraient peut-être pas très différents de ceux de notre planète, en dehors d'éventuels signes de vie. Les processus géologiques y auraient engendré des continents, des montagnes, des océans et une atmosphère, avec des nuages, des intempéries, etc.

Cependant la tectonique des plaques étant jusqu'à dix fois plus rapide que sur Terre, les montagnes s'érigeraient de façon accélérée. En raison de la plus forte gravité, elles seraient aussi moins hautes (par comparaison, Mars, moins massive, porte la plus haute montagne du Système solaire, Olympus Mons, qui culmine à 21 kilomètres d'altitude). La composition de l'atmosphère pourrait également être différente à cause de l'activité volcanique plus intense et du rythme plus lent d'échappement des gaz atmosphériques dans l'espace.

L'ère de l'exploration à distance des super-Terres ne fait que commencer. Nous anticipons une riche moisson de découvertes grâce à la mission *Kepler*. L'étape

suivante consistera à étudier les atmosphères de ces planètes pour voir si l'on peut y détecter des signes de vie. Nous devons déterminer au moins deux choses : de quoi est constituée la planète, et quels gaz abondent dans son atmosphère, ce qui est lié à sa dynamique interne.

Par analyse spectroscopique de la lumière de ces planètes, on pourra y détecter la signature de molécules telles que l'eau, le dioxyde de carbone ou le méthane. Dans quelques années, le télescope spatial *James Webb* (successeur du télescope spatial *Hubble*) permettra d'observer en infrarouge les atmosphères des super-Terres. Les cibles seront sélectionnées parmi les plus intéressantes et les plus proches des planètes découvertes par *Kepler* et CoRoT. Et avec un peu de chance, les projets qui prolongeront ces missions mettront au jour quelques super-Terres à transit très proches de nous, et donc faciles à étudier. Sinon, il faudra construire des instruments capables de détecter la lumière directe des planètes telluriques et d'analyser leur atmosphère même lorsqu'elles ne transitent pas. C'est l'objectif des projets Darwin ou *Terrestrial Planet Finder*, qui verront sans doute le jour prochainement. ■

La toundra, la taïga et le **réchauffement**

L'ESSENTIEL

- ✓ En comparant des photographies des années 1940 et des prises de vue récentes, on constate que les arbustes sont plus nombreux dans la toundra.
- ✓ La forêt boréale « brunit » en raison de la sécheresse, d'incendies plus intenses, et d'infestations par les insectes.
- ✓ Ces transformations ont des répercussions sur la faune, la flore et les habitants, et pourraient accélérer le réchauffement climatique.

Matthew Sturm

Dans les régions boréales, le réchauffement climatique réduit la surface occupée par les glaces, et modifie celle de la toundra et de la taïga.



1. LA VÉGÉTATION DU NORD DE L'AMÉRIQUE subit un verdissement de la toundra (zones beiges et marron), par exemple dans la région du North Slope (en haut à gauche), et un brunissement de la forêt boréale, ou taïga, la large bande verte s'étendant d'Ouest en Est.

climatique

À la fin de la Seconde Guerre mondiale, la marine américaine, à la recherche de nouveaux gisements de pétrole, entreprit de photographier le Nord de l'Alaska. Elle prit des milliers de clichés du *North Slope*, une région qui s'étend de l'océan Arctique jusqu'à la chaîne Brooks, située environ 500 kilomètres plus au Sud. Les vallées du versant méridional de cette chaîne, couvertes de forêts, furent également photographiées (voir l'encadré page 60). Cette série de photographies s'est révélée utile,

50 ans plus tard, pour comprendre comment les terres arctiques et subarctiques réagissent au réchauffement climatique. Cette connaissance est essentielle pour que les quatre millions de personnes qui vivent dans ces régions s'adaptent aux conséquences du réchauffement sur la chasse de subsistance, l'exploitation de la forêt, les transports et les infrastructures. Les transformations de la couverture végétale pourraient aussi avoir des répercussions globales. Par exemple, la fonte du pergélisol – le sol gelé en permanence qui caractérise les zones arctiques – libérerait du dioxyde de carbone et du méthane, deux des principaux gaz à effet de serre, ce qui accentuerait le réchauffement dans d'autres régions.

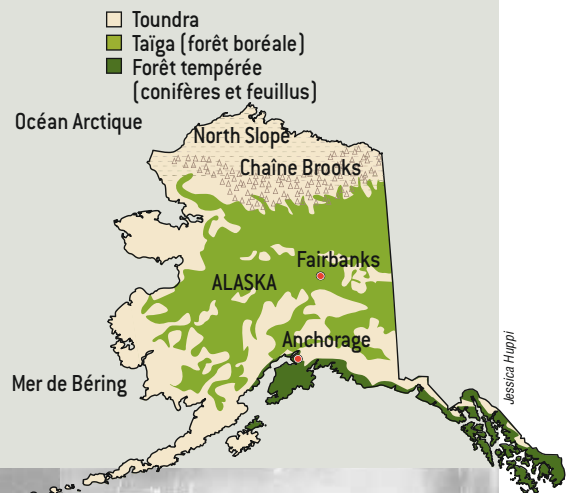
Bien avant qu'un ours polaire, juché sur une minuscule plaque de glace flottante, ne fasse la couverture du magazine *Time*, en 2006, on avait déjà compris que la glace arctique fondait. Dans les années 1990, ceux d'entre nous qui étudiaient les changements climatiques dans les régions boréales avaient de bonnes raisons de penser que la végétation arctique était aussi en train de changer. Mais les outils permettant de suivre ces modifications n'étaient pas aussi efficaces que ceux utilisés pour la glace de mer. Cette dernière, blanche, contraste fortement avec l'eau, sombre, et il est facile de la surveiller à partir de satellites et d'avions.

Les métamorphoses de la toundra

En revanche, les modifications de la toundra – la formation végétale sans arbres qui pousse sur le pergélisol – et la forêt boréale, ou taïga, peuvent être lentes et n'être détectables qu'au bout de plusieurs décennies. Toutefois, d'après des expériences réalisées en serres sur des parcelles



Un projet américain datant de la Seconde Guerre mondiale a permis de disposer de photographies qui nous permettent aujourd'hui de constater que la végétation arctique change. Craignant de manquer de pétrole, le gouvernement américain décida d'explorer le *North Slope*, une zone de neuf millions d'hectares du Nord de l'Alaska (zone en pointillés sur la carte ci-contre). Comme il n'existait aucune carte de cette région, les observateurs de la marine américaine prirent des milliers de photographies de très grande qualité. Ils volaient à basse altitude à bord d'un bimoteur *Beechcraft* (ci-dessous à gauche). Une caméra K-18, longue de près de un mètre (ci-dessous à droite), était installée dans l'ouverture de la porte. Les négatifs, d'environ 23 centimètres sur 46, donneront des images si nettes que des empreintes de sabots d'élans y seront visibles. Des photographies ont été prises dans les années 2000 au-dessus des mêmes sites. En les comparant aux anciens clichés, on a pu constater que la végétation arctique s'était modifiée.



L'AUTEUR



Matthew STURM est chercheur au Laboratoire de recherche et d'ingénierie des régions froides (CRREL), l'un des centres de recherche et développement du Corps des ingénieurs de l'US Army (USACE), à Fairbanks, en Alaska.

6 000 clichés à exploiter

À partir de ces indices expérimentaux, nous estimions qu'en raison du réchauffement de la toundra, le nombre d'arbustes et la biomasse végétale devaient augmenter. Plus au Sud, dans la taïga, la ligne d'arbres avait progressé à la fois vers le Nord et en altitude, d'après des relevés historiques. Nous nous attendions donc à ce que le réchauffement accélère cette tendance.

À cette époque, dans les années 1990, différentes équipes de recherche essayaient de déceler des changements dans la végétation par télédétection satellitaire ou en étudiant des petites parcelles au sol. Avec Chuck (Charles) Racine, Kenneth Tape, deux collègues de Hanover, dans le New Hampshire, et de Fairbanks, en Alaska, nous avons pensé pouvoir apporter de

nouvelles informations sur ces changements en examinant d'anciennes photographies et en les comparant à des prises de vue actuelles. Restait à les trouver !

Un jour, un archiviste nous révéla qu'il avait sur ses étagères des photos aériennes de la marine américaine réalisées dans les années 1940. Ces clichés étaient parfaits pour notre projet, et magnifiques. Et il y en avait plus de 6 000 !

Notre étude a commencé au cours de l'été 2000, axée sur la toundra. La définition de la toundra, avec sa végétation rase et son pergélisol, ne rend pas bien compte de la complexité de cet écosystème. Recouvrant environ cinq pour cent des terres émergées du globe, elle forme un épais tapis de mousses, de lichens et de graminées, parsemé d'autres végétaux, d'arbrisseaux et d'arbres nains. Vu du ciel, cet assemblage ressemble à un tapis pelucheux, vert uni. Au sol, c'est une mosaïque spongieuse. Ce tapis n'est pas plat. Il s'y forme de petits monticules, parfois hauts d'une cinquantaine de centimètres, qui sont souvent instables.

Plus la latitude est élevée, plus la toundra devient clairsemée, jusqu'à ce que les arbustes disparaissent. Même les mousses

et les lichens finissent par laisser place à de vastes zones de sol dénudé, le désert polaire. Inversement, vers le Sud, la toundra est d'abord parsemée de quelques épicéas, puis vient une mosaïque de toundra et de forêt, et enfin la forêt boréale, la taïga. La transition entre les deux écosystèmes peut être abrupte, ou s'étendre sur des dizaines de kilomètres. En Alaska, cette frontière coïncide en grande partie avec le versant Sud de la chaîne Brooks.

Notre étude comparative exigeait donc de nouvelles photographies. En hélicoptère, munis de copies des anciens clichés, nous avons photographié à nouveau plus de 200 zones du *North Slope* au cours de quatre étés. Image après image, nous avons constaté que les arbustes, parfaitement identifiables, étaient plus gros que 60 ans plus tôt. Des bosquets s'étaient étendus dans la toundra là où la taille des arbustes était jadis inférieure à notre limite de détection, soit environ 50 centimètres de haut. Le saule, le bouleau et l'aulne, les trois principales essences de l'Arctique, avaient conquis de nouvelles surfaces et grossi. Des «troupes de choc» formées de ces arbustes avaient envahi les terrasses bordant d'anciennes rivières, colonisant des hectares de territoire en quelques décennies seulement.

L'Arctique arbustif

Sur le terrain, cette transformation s'est vue confirmée. Les arbustes qui apparaissaient comme de petites taches noires sur nos clichés étaient en fait aussi grands qu'un homme. Souvent, ils étaient entourés de groupes d'arbrisseaux, que l'arbuste semblait protéger des vents violents et des tempêtes de neige. En certains endroits, des fourrés impénétrables s'étaient formés. À la fin du deuxième été, après avoir battu la campagne à travers des dizaines de ces fourrés, nous avons qualifié ces zones

d'«Arctique arbustif». Au total, les arbustes s'étaient disséminés sur plus de 200 000 kilomètres carrés en Alaska.

Mais que se passait-il dans la toundra située hors de l'Alaska et dans les forêts de la taïga, plus au Sud ? Pour répondre à cette question, des climatologues ont utilisé les radiomètres embarqués dans les satellites météorologiques de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). En calculant l'indice de végétation normalisé, ou NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), fondé sur la réflexion par la végétation du rouge et du proche infrarouge, ils ont découvert que la toundra verdissait, autrement dit que sa biomasse augmentait. La composante arbustive de la toundra était donc en expansion.

Cet indice de végétation augmentait davantage en Alaska arctique, à l'Ouest du Canada et en Sibérie, mais aussi en Scandinavie et dans d'autres régions de l'Arctique. D'autres collègues trouvèrent des résultats similaires, tandis que les souvenirs d'habitants de régions arctiques, en Alaska, au Canada et en Russie, confirmèrent que le nombre d'arbustes avait crû sur l'ensemble de l'Arctique.

En comparant les données satellitaires les plus récentes sur le verdissement et nos clichés aériens, nous avons découvert que la toundra compte aussi davantage d'arbrisseaux (dont la taille est inférieure à la limite de photodétection). Ces petits arbustes, situés entre les monticules, sont omniprésents et ont une certaine faculté d'adaptation : leur croissance s'accélère quand les conditions s'améliorent. Ces mini-arbustes étant déjà présents sur une vaste zone, la biomasse croît sûrement plus vite qu'auparavant.

Un tel phénomène de croissance arbustive n'est pas sans précédent. D'après les pollens retrouvés dans des carottes

Petit lexique de l'Arctique

✓ Toundra

Formation végétale de l'Arctique dépourvue d'arbres, caractérisée par une végétation dense et rase. Le sous-sol y est gelé en permanence.

✓ Taïga ou forêt boréale

Forêt caractéristique des régions situées juste au Sud du cercle polaire arctique. Elle ne s'étend pas vers le Nord au-delà d'une température moyenne du mois le plus chaud inférieure à 10 °C. Composée surtout de conifères (pins, épicéas, sapins et mélèzes) et de feuillus (peupliers faux-trembles, bouleaux, saules) le long des cours d'eau, elle constitue le plus vaste écosystème du monde.

✓ Albédo

Fraction de la lumière reçue qui est réfléchi par un corps ou une surface. La neige et la glace, excellents réflecteurs, renvoient dans l'espace, selon leur âge, entre 50 et 90 pour cent de la lumière solaire, limitant ainsi le réchauffement du sol.

2. LA FONTE DU PERGÉLISOL

provoque la formation de ravines typiques d'une morphologie géologique nommée thermokarst. Ces structures, photographiées ici dans les années 1940 par la marine américaine le long de la rivière Colville, sur le flanc Nord de la chaîne Brooks, accumulent de la neige, et influencent le régime hydrologique de la toundra.





U.S. Navy



Ken Tape

3. EN COMPARANT DES PHOTOGRAPHIES prises dans le Nord de l'Alaska, l'une dans les années 1940 (*en haut*) et l'autre à la même époque de l'année au début des années 2000, nous avons constaté que la couverture végétale augmentait. La seconde photographie, datant de 2002, montre des arbustes de la taille d'un homme, sortes de « troupes de choc » qui progressent sur la toundra (*rectangle blanc*), là où ils n'existaient pas 60 ans plus tôt.

de sédiments, les arbustes ont envahi la toundra il y a environ 8000 ans, un phénomène connu sous le terme d'« explosion de bouleaux ». Les données satellitaires ont fourni un résultat encore plus surprenant pour la taïga. Bien que des études aient confirmé que le front d'arbres se déplace vers le Nord et en altitude, les forêts perdent de la biomasse et deviennent moins productives à l'arrière de ce front. Elles brunissent tandis que la toundra verdit, ce qui semble contredire l'idée que la forêt réagit au réchauffement climatique en augmentant sa biomasse.

Il y a une dizaine d'années, Glenn Juday et Martin Wilmking, alors à l'Université de Fairbanks, ont rassemblé des échantillons d'anneaux de croissance d'arbres de la région. Au lieu que des températures plus élevées améliorent le développement, et par conséquent l'épaisseur des anneaux de croissance, ils ont constaté que les cernes de croissance étaient plus petits, ce qui montre que ces arbres avaient poussé plus lentement. En effet, dans l'Ouest de l'Alaska, où le temps est plus humide, les arbres se développent plus vite lorsque la température augmente ; mais à l'Est, le pays est plus sec en été, de sorte que les peuplements d'arbres poussent moins vite, voire dépérissent si l'été est très chaud.

À partir des mesures d'anneaux de croissance qu'ils ont pu retrouver, deux autres spécialistes de dendrochronologie ont confirmé que le brunissement de la

taïga concerne bien toute la région arctique et toutes les espèces d'arbres. Le brunissement s'observe le plus souvent dans des sites secs et dans la partie méridionale du domaine de chaque espèce. On peut en conclure que la sécheresse et la chaleur sont les principaux coupables.

Un brunissement généralisé

Deux autres causes sont en jeu, vraisemblablement liées au réchauffement climatique : la fréquence et l'intensité des feux de forêts et des invasions d'insectes. En Alaska, les grands feux de forêt semblent survenir tous les cinq ans environ, alors que leur fréquence était auparavant plus proche de dix ans. Les attaques d'insectes, tel le dendroctone de l'épinette (*Dendroctonus rufipennis*), ont ravagé plus de 500 000 hectares de forêt en Alaska ces 30 dernières années. Elles semblent s'intensifier depuis, en raison d'hivers plus doux et d'étés plus chauds qui favorisent la survie des larves et accélèrent le cycle de vie des insectes.

Les forêts boréales ont gagné, selon les estimations, 11 600 kilomètres carrés sur la bordure Sud de la toundra en 50 ans. Mais durant la même période, elles se sont asséchées, ont brûlé et ont été endommagées au Sud du front de progression. Ces évolutions contraires risquent de transformer la forêt en prairie. Dans le même temps, les arbustes se multiplient

✓ SUR LE WEB

Arctic Climate Impact Assessment (ACIA) : <http://amap.no/acia/>

ArcticNet : <http://www.arcticnet.ulaval.ca/index-fr.php>

State of the Arctic Conference 2010 : <http://soa.arcus.org/>

International Tundra experiment (ITEX) : <http://www.geog.ubc.ca/itex/>

Quelques autres clichés pris en Alaska par la marine américaine : <http://www.ScientificAmerican.com/arctic-plants>

dans la toundra. La forêt va-t-elle se métamorphoser en toundra, et cette formation végétale en forêt ?

Nous comprenons encore mal les mécanismes de ces évolutions. Les modèles prédictifs sont imparfaits. Ainsi, alors que la glace de mer dans l'Arctique suit des lois physiques, la quantité de glace a diminué deux fois plus vite que ne le prévoyaient 13 des meilleurs modèles à grande échelle. Selon les prévisions actuelles, l'océan Arctique aura perdu ses glaces d'ici 40 ans, mais ces prévisions sont plus des extrapolations des changements observés que les résultats de modèles.

Quant à la toundra et à la taïga, leur complexité biologique et les mécanismes parfois opposés qui contrôlent la croissance végétale empêchent les modèles actuels de fournir des prévisions précises.

Une croissance ancienne qui s'accélère

Nous avons essayé d'aborder ce problème pour les arbustes de la toundra en utilisant un modèle simple de croissance et notre étude comparative des photographies aériennes. Nous nous attendions à ce que l'expansion de la toundra arbustive coïncide avec le réchauffement rapide de l'Arctique, qui s'est produit depuis les années 1970. Mais le modèle indiquait qu'elle avait commencé il y a 150 ans environ, à la fin du « Petit Âge glaciaire » qui a marqué l'Europe et l'Amérique du Nord

de 1550 à 1860. Cela correspondait exactement à la première apparition, dans la région du *North Slope*, des élans, qui broutent les arbustes.

Ainsi, les arbustes ont progressé lentement en réponse à un cycle de réchauffement naturel amorcé bien avant la révolution industrielle. Cependant, d'autres indices suggèrent que cette expansion se poursuit et s'accélère, en raison du réchauffement dû aux activités humaines. Durant 40 ans, dans les régions où les arbustes se sont multipliés, les glaciers ont reculé, le réchauffement du pergélisol s'est accéléré et le printemps commence plus tôt, comme l'indiquent les dates de gel et de dégel des rivières et des lacs. Malheureusement, il est peu probable que nous trouvions une collection de photographies datant des années 1900, ce dont nous aurions besoin pour établir que l'expansion des arbustes s'est accélérée depuis 1950.

Le même modèle prévoit qu'il faudra 150 ans pour que les zones de toundra arbustive soient complètement recouvertes d'arbustes ; là où la toundra reste rase, cela prendra encore plus de temps. Toutefois, ces prévisions ne prennent pas en compte les effets catastrophiques des incendies, qui pourraient modifier la végétation : les arbustes ont tendance à prospérer dans les zones perturbées par le feu. Et il existe sans doute des rétroactions qui pourraient accélérer le changement.

Je crois que le paysage de toundra risque de changer bien plus vite que ne le prévoit notre modèle grossier, en raison

✓ BIBLIOGRAPHIE

A. L. Swann *et al.*, *Changes in Arctic vegetation amplify high-latitude warming through the greenhouse effect*, *PNAS*, vol. 107, pp. 1297-1300, 2010.

H. Balzter, *Environmental Change in Siberia. Earth Observation, Field Studies and Modelling*, Springer, 300 p., 2010.

B. C. Forbes *et al.*, *Russian arctic warming and « greening » are closely tracked by tundra shrub willows*, *Global Change Biology*, vol. 16, pp. 1542-1554, 2009.

J. M. G. Hudson et G. H. R. Henry, *Increased plant biomass in a high Arctic heath community from 1981 to 2008*, *Ecology*, vol. 90, pp. 2657-2663, 2009.

D. Blok *et al.*, *Shrub expansion may reduce summer permafrost thaw in Siberian tundra*, *Global Change Biology*, vol. 16, pp. 1296-1305, 2009.

D. Verbyla, *The greening and browning of Alaska based on 1982-2003 satellite data*, *Global Ecology and Biogeography*, vol. 17, pp. 547-555, 2008.



Gastus Shaver/Marine Biological Laboratory



4. EN SERRE, SI L'ON RÉCHAUFFE le sol, les arbustes de la toundra poussent jusqu'à hauteur d'homme (*ci-dessus, le toit de la serre a été enlevé*). Ceux qui poussent sur un sol non chauffé ne dépassent pas 50 centimètres. Dans la nature (*à gauche*), de plus en plus d'arbustes atteignent une hauteur d'homme. Ces arbustes protégeraient les plus petits du vent et de la neige et favoriseraient une croissance en cercles concentriques autour d'eux (*lignes jaunes*).

La Sibérie brûle aussi

La recrudescence des feux de forêts et de toundra touche d'autres régions que l'Alaska. Ainsi, en Russie, où la forêt occupe 800 millions d'hectares, soit 47 pour cent du territoire, on a enregistré en 2010 près de 30 000 incendies. Plus de 11 millions d'hectares se sont consumés, d'après le Centre global de suivi des incendies (GPMC), à Freiburg.

Le feu de forêt ou de toundra est banal en Russie. L'année 2010 n'est exceptionnelle que par la canicule qui a sévi en juillet (jusqu'à 42 °C dans certaines régions) et parce que les incendies ont frappé les régions urbanisées, provoquant une cinquantaine de morts. En 2009, au contraire, la majorité des feux (15 millions d'hectares) ont concerné les zones peu habitées de Sibérie orientale, comme c'est le cas généralement.

Depuis une vingtaine d'années, les incendies touchent des régions de plus en plus septentrionales, tels la Yakoutie, au Nord-Est de la Sibérie, et le Kamtchatka, en Extrême-Orient. En

outre, ils sont plus précoces, se manifestant dès mars, ce qui surprend les populations, habituées à de longs hivers. Un climat plus chaud et sec augmente le risque naturel d'incendie. De fait, une équipe de l'Institut Sukachev de la forêt a montré en 2005 que la probabilité qu'une même zone de Sibérie soit touchée par un feu était d'une fois tous les 100 ans au XX^e siècle, alors qu'elle est aujourd'hui d'une fois tous les 65 ans, en moyenne. Selon le Centre Hadley de météorologie du Royaume-Uni, la forêt boréale pourrait être remplacée progressivement par une végétation arbustive de steppe. On a observé par ailleurs, en Yakoutie, que les feux de toundra sont plus fréquents.

Quelles sont les causes des feux de forêt en Russie ? La première est la combustion spontanée des tourbières. Ces écosystèmes émettent des gaz qui tendent à s'enflammer par forte chaleur ; les feux y couvent et peuvent se propager aux forêts voisines. La foudre est l'autre facteur déclenchant. Les activi-

tés humaines et les pyromanes viennent en troisième lieu, sauf en 2010 où les incendies ont touché plus de zones habitées que d'ordinaire. La désorganisation du système de gestion centralisé de forêts qui prévalait jusqu'en 2000 a été aussi montrée du doigt, à juste titre.

Les conséquences des feux de forêts varient selon les régions. À l'Est, où la forêt est exploitée par des sociétés russes et coréennes, la surface forestière tend à augmenter. On manque de données pour le reste du territoire. Quoi qu'il en soit, la population russe commence à prendre conscience du risque de voir partir en fumée sa forêt. Celle-ci n'est plus une « mer sans fin », les feux qui l'embrassent ont désormais des conséquences tangibles. Avec les incendies de 2010, et alors que le réchauffement accentue ce risque naturel, il est possible que la Russie réfléchisse enfin aux moyens de gérer durablement ses forêts.

Marie-Hélène Mandrillon,
CERCEC, CNRS-EHESS, Paris

des incendies. Par exemple, de juillet à septembre 2007, au cours d'une saison exceptionnellement sèche, le plus grand incendie de toundra jamais enregistré, provoqué par la foudre, a consumé plus de 100 000 hectares du *North Slope*. En 2009, en de nombreux endroits, des arbustes avaient déjà repoussé. Dans des zones de toundra brûlées auparavant, à l'Ouest de l'Alaska, l'étendue de la couverture arbustive a été multipliée par huit en 30 ans. Or une augmentation des impacts de foudre et de la sécheresse risque de déclencher plus d'incendies. En outre, les arbustes, avec leur biomasse et leurs ramifications plus importantes, brûlent facilement, ce qui accroît le risque.

Parmi les autres effets rétroactifs qui peuvent stimuler la croissance des arbustes dans la toundra, deux sont liés à la couverture neigeuse hivernale. Il peut sembler paradoxal que l'hiver favorise la croissance des arbustes, puisque ceux-ci grandissent en été. En fait, l'hiver influe sur les conditions du sol et la quantité d'eau disponible pour la saison suivante. La toundra est recouverte de neige neuf mois par an, et la taïga sept mois.

Quand la neige réchauffe

Là où des arbustes arrivent à recouvrir tous les monticules de la toundra, ils « piègent » la neige, produisant des congères qui épaississent la couverture neigeuse autour d'eux. La neige est un excellent isolant : une couche de neige peut contenir jusqu'à 75 pour cent d'air. Là où elle est plus épaisse et donc plus isolante, les températures du sol sont plus élevées qu'elles ne le seraient autrement.

Ainsi, dans certaines zones arbustives, nous avons mesuré des températures à la base de la couche de neige supérieures de 10 °C à celles des zones adjacentes. Cette douceur prolonge l'action des micro-organismes du sol au cours de l'hiver et favorise la dégradation de la matière organique en éléments nutritifs. Les arbustes peuvent stocker davantage de nutriments. Quand vient l'été, ils sont plus robustes, croissent vigoureusement et deviennent plus grands ; ils peuvent alors piéger plus de neige l'hiver suivant, renforçant le processus.

L'autre effet rétroactif lié à la neige provient de l'albédo, c'est-à-dire de sa réflectivité. Les branches noires des grands



Alaska Stock

5. LES GRANDS INCENDIES DE FORÊT semblent survenir plus fréquemment dans les régions arctiques, et ils sont plus intenses. Ces feux, ainsi que les dégâts causés sur des dizaines de millions d'arbres par les insectes, ont pour effet de « brunir » la forêt boréale. Or les arbustes prospèrent dans ces zones brûlées. Leurs ramifications plus importantes augmentent le risque d'incendies de grande envergure et, par-là, la probabilité que les arbustes prolifèrent encore.

arbustes absorbent beaucoup plus d'énergie solaire que la neige blanche, suffisamment pour provoquer localement un réchauffement et accélérer la fonte de la neige au printemps ; cela a pour effet d'avancer la saison de croissance végétale et de stimuler les arbustes, qui deviennent encore plus grands.

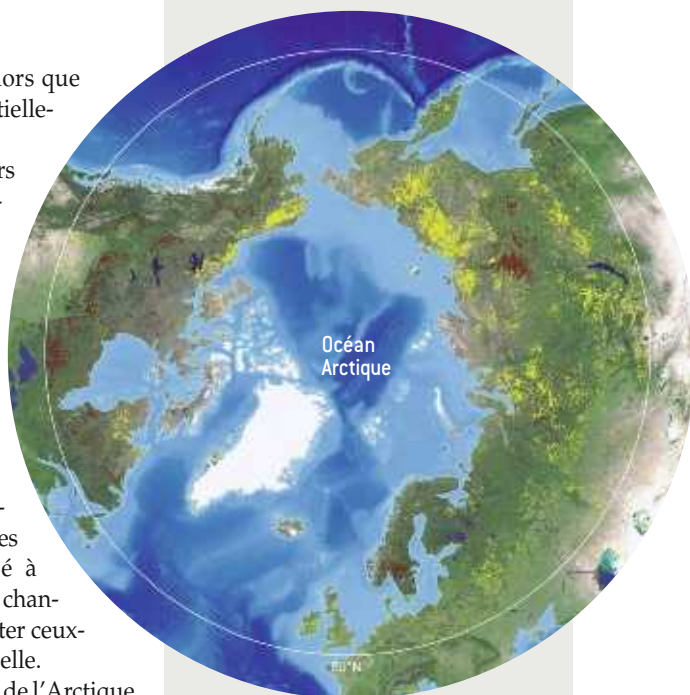
Les effets rétroactifs ne sont pas indépendants les uns des autres, ni des mécanismes de croissance estivale, de sorte que leur effet global est difficile à prévoir. Par exemple, les épaisses congères qui se forment près des arbustes devraient en principe mettre plus de temps à fondre que la neige plus mince des alentours. L'effet de fonte dû à l'absorption d'énergie par les branches des arbustes peut-il surpasser l'inhibition de la fonte due à l'épaisseur de la neige ? Ou bien est-ce l'inverse, ce qui freinerait la croissance de la végétation ?

En été, les ombres et les litières de feuilles ont aussi des effets antagonistes. L'ombre due à la canopée des grands arbustes abaisse les températures du sol, ce qui freine l'action microbienne stimulée par les congères en hiver, et ainsi la

croissance des arbustes, alors que les litières stimulent potentiellement cette croissance.

De nombreux chercheurs tentent de modéliser ces différents effets afin de mieux prévoir les transformations de la toundra et de la taïga. Certains paramètres clés restent inconnus, par exemple l'évolution de la quantité de neige qui tombera dans les régions arctiques. Les seuls modèles informatiques ne permettront pas de répondre à ces questions. Notre capacité à mesurer physiquement les changements en cours et à projeter ceux-ci dans l'avenir sera essentielle.

Comment la végétation de l'Arctique évoluera-t-elle ? À quelle vitesse ? Les écosystèmes concernés sont si complexes qu'il sera difficile d'obtenir un modèle prédictif fiable. Mais si nous ne nous attelons pas à la tâche dès maintenant, nous serons incapables d'anticiper les conséquences de ces évolutions.



6. CETTE CARTE DE L'ARCTIQUE a été établie d'après des données satellitaires. Les zones couvertes d'arbustes se sont agrandies (*en vert clair*), alors que la taïga s'est asséchée et comprend moins d'arbres (*en brun*).

Scott Goetz/Woods Hole Research Center



Research

- Salon européen des carrières de la recherche
- Europäische Messe für Forschung und Karriere
- European research career fair



Paris

19 novembre 2010
November 19, 2010

- **60 exposants**
Entreprises, centres et laboratoires de recherches, campus européens
- **60 exhibitors**
Companies, Research centres and laboratories, European campuses
- **5 conférences**
5 conferences

L'événement européen de votre carrière

The European event dedicated to your career

- **Recrutement / Recruitment**
- **Conseils / Advice**

Pré-inscription et informations sur:
Registration and information online:

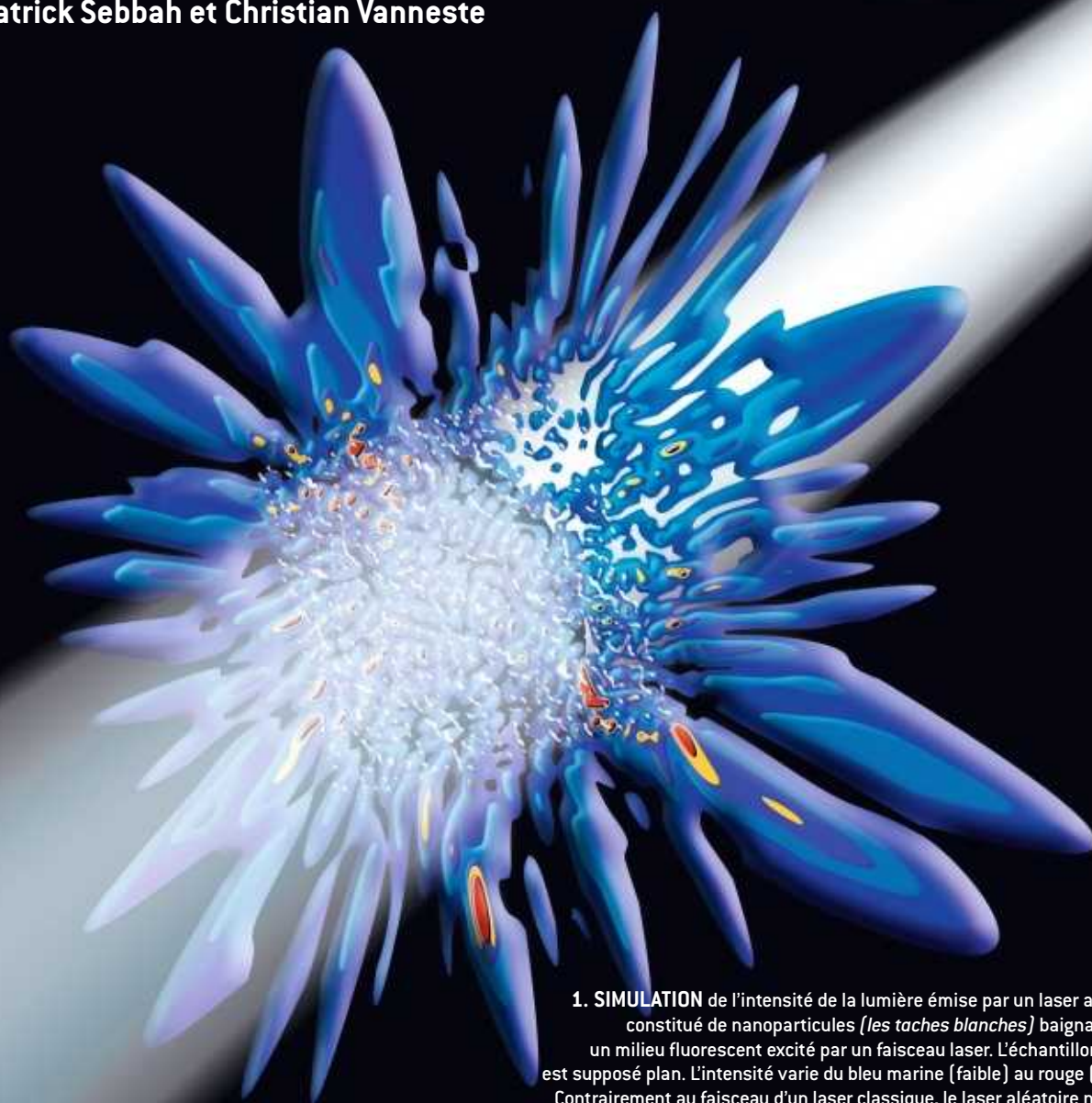
www.ResearchCareerFair.com



Physique

Le laser aléatoire : un **vrai** laser ?

Patrick Sebbah et Christian Vanneste



1. SIMULATION de l'intensité de la lumière émise par un laser aléatoire constitué de nanoparticules (*les taches blanches*) baignant dans un milieu fluorescent excité par un faisceau laser. L'échantillon, carré, est supposé plan. L'intensité varie du bleu marine (faible) au rouge (haute). Contrairement au faisceau d'un laser classique, le laser aléatoire n'est pas directionnel. Il dépend néanmoins de la géométrie du système, émettant par exemple dans un plan lorsque l'échantillon est bidimensionnel.