

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

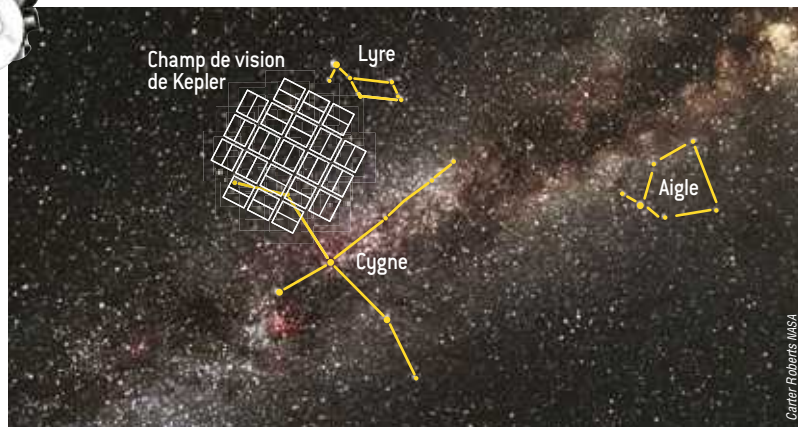
Sur une super-Terre, la durée de formation et la durée de vie des plaques raccourcissent, ce qui rend le cycle carbone-silicate plus rapide et moins sensible aux perturbations. À certains égards donc, les super-Terres pourraient être encore plus hospitalières pour la vie que les planètes de la taille 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.

A satellite image of the Arctic region, showing the North Pole and surrounding landmasses. The image is color-coded to show vegetation changes. The Arctic region is predominantly red, indicating a decrease in snow and ice cover. The surrounding landmasses, including North America, Europe, and Asia, show various shades of green and brown, indicating changes in forest cover and tundra vegetation. The image is taken from a high angle, showing the curvature of the Earth.

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

A 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

Jean-François Pédron et NASA

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.



Jessica Huppi



AP Photo



National Museum of the U.S. Air Force

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.

de toundra, nous savions que la fertilisation et le réchauffement du sol accélèrent la croissance des arbustes au détriment des plantes non ligneuses, tels les roseaux et les mousses. Des bouleaux nains, par exemple, poussent à hauteur d'homme en quelques années.

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