

> de dinosaures et de mammifères primitifs. Il était encore rattaché à l'Amérique du Sud, formant le dernier vestige du supercontinent Gondwana, dont l'Afrique et l'Australie s'étaient déjà séparées. Ce n'est qu'après s'être détaché de l'Amérique du Sud, il y a environ 35 millions d'années, que l'Antarctique a plongé dans un grand froid qui a éliminé du continent la plupart des espèces.

UNE ORIGINE TRÈS ANCIENNE

Une deuxième étude réalisée en 2005 a mis en évidence que l'origine de certains collembolés antarctiques est très antérieure aux récentes périodes glaciaires. Ian Hogg et son ancien doctorant Mark Stevens, qui avaient travaillé ensemble à l'université de Waikato, en Nouvelle-Zélande, ont utilisé des séquences de gènes afin d'estimer, pour plusieurs espèces de collembolés antarctiques, quand celles-ci avaient divergé des espèces d'Australie, de Nouvelle-Zélande et de Patagonie. Leurs résultats ont montré que la séparation datait d'au moins 10 à 20 millions d'années.

Ces découvertes et d'autres similaires ont laissé de nombreux scientifiques perplexes. Comment ces minuscules organismes ont-ils pu traverser tant de périodes glaciaires ? Certains chercheurs ont avancé qu'ils auraient pu survivre dans de petites vallées isolées, les vallées sèches de McMurdo, dans la partie nord des montagnes Transantarctiques, à 850 kilomètres au nord de l'endroit où Ian Hogg et Byron Adams ont trouvé *Tullbergia*. Ces vallées sont étrangement restées libres de glace au cours des 12 derniers millions d'années. D'autres chercheurs ont émis l'hypothèse que durant les périodes glaciaires, les organismes en question ont trouvé refuge dans des points chauds géothermiques situés à proximité d'une poignée de volcans qui ponctuent le littoral du continent. Et qu'après avoir survécu à la période glaciaire dans ces zones côtières, ces espèces auraient gagné l'intérieur des terres et atteint des montagnes comme celles proches du glacier de Shackleton.

Mais ces idées n'ont pas résisté aux observations. Byron Adams explique qu'on ne retrouve pas *Tullbergia* ou les autres bestioles dans d'autres parties de l'Antarctique. « On ne les trouve pas à proximité des volcans, on ne les trouve pas sur les côtes », dit-il, ce qui contredit l'idée qu'ils ont vécu par le passé dans ces endroits reculés.

Entre 2006 et 2017, Ian Hogg a visité plus d'une dizaine d'endroits le long des monts Transantarctiques afin de collecter des spécimens vivants. Avec Byron Adams, qui a participé à certains de ces voyages, il a trouvé cinq espèces de collembolés, toutes connues auparavant. Mais ils n'ont pas découvert de *Tullbergia* avant l'exploration du mont Speed en 2018.

Après que Ian Hogg a ramené à son laboratoire des spécimens de *Tullbergia*, son équipe a commencé à analyser des séquences génétiques des collembolés. La doctorante Gemma Collins a séquencé un court fragment d'ADN de chaque individu, le gène mitochondrial codant la sous-unité 1 de la cytochrome C oxydase, dont la variabilité est un bon indicateur de l'histoire évolutive des espèces. Elle a passé des mois à comparer les séquences d'ADN de plus de 1100 individus trouvés à différents endroits le long de la chaîne Transantarctique (dont certains avaient été collectés des années auparavant). Ces comparaisons permettraient de déterminer quels animaux, le cas échéant, partagent une histoire commune. Elles révéleraient si des populations de différents endroits ont été isolées les unes des autres, peut-être par l'expansion des calottes glaciaires, ou si elles ont pu se déplacer vers de nouveaux territoires lorsque la glace était peu abondante.

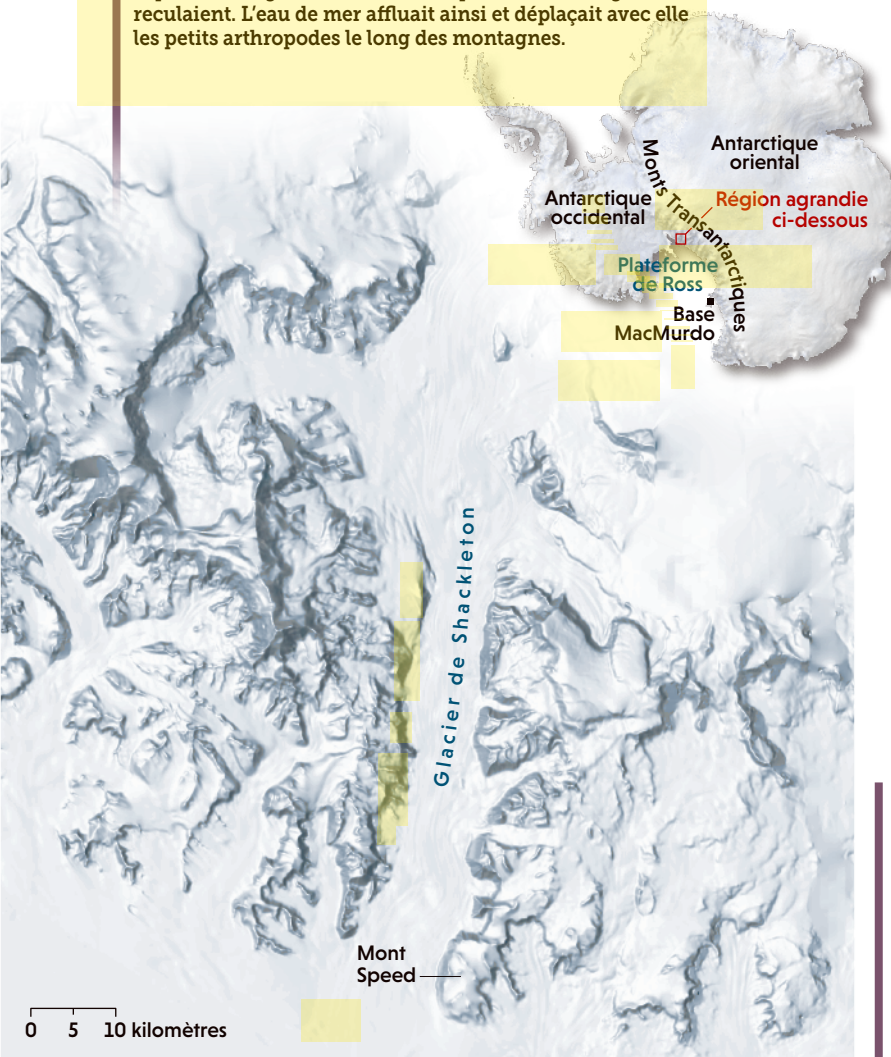
Lors des périodes les plus chaudes qui s'intercalaient entre les périodes glaciaires, la calotte glaciaire de l'Antarctique occidental se serait amincie et aurait reculé. Et la plateforme glaciaire de Ross, qui flotte sur la mer en bordant la plupart des montagnes centrales et méridionales, a probablement disparu. Ces deux événements auraient permis à l'océan libre de s'avancer vers l'intérieur des terres le long de la chaîne montagneuse, mais en atteignant des altitudes moins élevées que ne l'avaient fait les calottes glaciaires. Ian Hogg spéculait que lors de ces épisodes chauds, les minuscules arthropodes s'étaient probablement déplacés et que différentes populations de la même espèce, auparavant isolées, s'étaient rencontrées et hybridées puisque de plus grandes étendues de terre étaient libres de glace. Les collembolés auraient pu se disperser en flottant sur l'eau. Selon Ian Hogg, ils s'installaient dans un nouvel habitat, puis parvenaient à s'y maintenir pendant 50000 ou 100000 ans, avant que les glaces recouvrent de nouveau la pente.

Mais les résultats obtenus pour *Tullbergia* et *Antarctophorus* suggèrent que même en période chaude, le mouvement de ces animaux était plus restreint qu'on ne le pensait. Deux populations auxquelles appartiennent des *Antarctophorus* collectés sur des crêtes exposées de part et d'autre du glacier de Shackleton semblent ne pas s'être hybridées depuis cinq millions d'années, bien qu'elles vivent à seulement 10 kilomètres l'une de l'autre, soit la largeur de la brèche que traverse le glacier. « C'est assez surprenant, commente Ian Hogg. Cinq millions d'années, c'est long. » Il semble que l'espèce n'ait pas du tout voyagé.

Pourtant, les indices géologiques montrent que lors d'une période particulièrement chaude, il y a trois à cinq millions d'années, la calotte glaciaire de l'Antarctique occidental

DES HABITATS AU CŒUR DES GLACES

Les monts Transantarctiques séparent les vastes calottes glaciaires de l'Antarctique oriental et occidental, mais certains glaciers comme le Shackleton suintent d'est en ouest par des brèches séparant les sommets. Les chercheurs ont trouvé le collembole *Tullbergia mediantarctica* sur la pente du mont Speed faisant face au glacier (en bas). Comment cette espèce s'est-elle retrouvée là ? Selon l'une des hypothèses, au cours des périodes chaudes, la plateforme glaciaire de Ross disparaissait et les glaciers reculaient. L'eau de mer affluait ainsi et déplaçait avec elle les petits arthropodes le long des montagnes.



autre population vivant 160 kilomètres plus au nord, le long des montagnes, depuis au moins huit millions d'années.

Ces résultats suggèrent que même lorsque la calotte glaciaire de l'Antarctique occidental s'est effondrée, il restait encore suffisamment de glace dans les monts Transantarctiques pour empêcher les collemboles de se déplacer.

L'analyse des *Tullbergia* collectés autour du glacier de Shackleton a étonné encore plus les chercheurs : les séquences de gènes étaient pratiquement identiques sur les quatre sites. Cela pourrait signifier que tous ces collemboles descendent de quelques individus et qu'ils ne se sont jamais hybridés avec des populations extérieures.

QUAND LA TOXICITÉ SE FAIT SENTIR

Comment des *Tullbergia* ont-ils pu persister pendant des millions d'années, bloqués par la glace durant au moins 30 périodes glaciaires, sans se déplacer de plus de quelques kilomètres ou se reproduire avec des individus d'autres populations ? Cette question est d'autant plus intrigante que pendant une grande partie de cette période, ces animaux étaient piégés dans une zone étroite, cernée par la glace d'un côté et par un sel tout aussi mortel de l'autre.

En effet, lorsque Ian Hogg et Byron Adams ont effectué des vols en hélicoptère au-dessus du glacier de Shackleton, en 2018, ils ont souvent constaté une légère ligne de démarcation sur les flancs des montagnes : à quelques centaines de mètres au-dessus de la surface de la glace, la roche changeait de couleur, passant de plus claire au-dessus de la ligne à plus sombre au-dessous. Ces « lignes de démarcation » indiquent la hauteur à laquelle la glace s'est élevée au cours de la dernière période glaciaire – elles résultent de subtiles différences dans la façon dont les minéraux s'oxydent lorsqu'ils sont exposés à l'air plutôt que recouverts de glace.

Il est facile d'imaginer qu'à mesure que les glaciers s'épaississaient, les animaux migraient plus haut sur le flanc de la montagne, afin de rester au-dessus de la glace. Mais cette hypothèse pose un problème majeur : les parties supérieures des montagnes sont chargées en substances toxiques. Si l'on retourne un rocher au-dessus de la ligne de démarcation à Shackleton ou dans toute autre montagne de la chaîne Transantarctique, le sol en dessous est souvent recouvert d'une croûte de sel blanc. « Ce n'est pas du bon sel. Ce n'est pas du sel gemme de l'Himalaya », explique Byron Adams. « Mettez votre langue là-dessus et vous verrez. »

C'est du sel riche en nitrate (NO_3^-), toxique pour de nombreux organismes vivants. Il pleut en permanence du nitrate sur la Terre, celui-ci se formant par l'action du rayonnement ultraviolet sur les gaz atmosphériques. Dans la ➤

s'est effondrée à plusieurs reprises. Des collemboles auraient pu se déplacer en flottant le long de la chaîne de montagnes lors de l'intrusion de l'océan, franchir les 10 kilomètres d'écart et s'y reproduire avec des collemboles génétiquement différents. Mais les populations d'*Antarctophorus* n'en avaient rien fait. Les résultats génétiques obtenus par le laboratoire de Ian Hogg ont également montré que des groupes d'*Antarctophorus* du glacier de Shackleton ne s'étaient pas croisés avec une



VUE DORSALE



Blanc quand il est vivant, hérissé de petites soies, le collembole *Tullbergia mediantarctica* se dessèche rapidement et meurt lorsqu'il est exposé à l'air libre. Sur les restes de cet individu, coloré et fortement agrandi, l'exosquelette de la tête, dur, apparaît en rouge ; le reste de la cuticule, plus souple, est en vert.

> plupart des régions du monde, il ne s'accumule pas dans les sols, car les pluies le lessivent. Mais dans les endroits secs, comme sur les monts Transantarctiques, il peut s'accumuler au fil des millénaires jusqu'à atteindre des niveaux toxiques. Ces lieux d'altitude accumulent également du perchlorate (ClO_4^-), un oxydant utilisé dans les désinfectants et les propulseurs de fusée – et présent à la surface inhospitalière de la planète Mars, comme l'a découvert en 2008 la sonde *Phoenix*.

Les sels constituent un redoutable écueil pour les petits animaux, tels les collembolles, qui tentent d'échapper à la progression des glaciers : rester sur place signifie qu'ils seront enterrés sous la glace, tandis que remonter la pente mène à des milieux toxiques.

Bien sûr, Ian Hogg et Byron Adams n'ont trouvé que des collembolles vivant en dessous de la ligne de démarcation. Cependant, ces endroits ont vraisemblablement été recouverts par 100 mètres de glace ou plus au dernier maximum glaciaire, et il aurait été impossible pour des formes de vie aussi complexes de survivre dans la glace pendant des dizaines de milliers d'années. Alors, où sont allés ces hexapodes ?

L'HISTOIRE RÉÉCRITE

La survie de tout animal dépend de l'eau, et l'eau semble indiquer une explication à l'improbable résistance de *Tullbergia*.

À 700 kilomètres au nord-ouest du glacier de Shackleton, les monts Transantarctiques émergent de l'intérieur du continent et commencent à longer le littoral. C'est là que se situent les vallées sèches de McMurdo. Malgré la sécheresse, plusieurs de ces vallées isolées abritent des lacs couverts de glace, alimentés par les eaux de fonte estivales. Ces lacs ne sont profonds que de quelques mètres, mais on observe dans le haut des parois de certaines vallées des lignes de rivages anciens de sable et de gravier. Ces lignes de rivages suggèrent que ces vallées ont contenu autrefois des centaines de mètres de hauteur d'eau, apportée par des ruisseaux dévalant les montagnes.

L'idée est cependant incomplète, car les vallées, étant ouvertes à leur extrémité du côté

mer, n'ont rien pour retenir des eaux aussi profondes. Les scientifiques supposent donc qu'au cours d'une précédente période glaciaire, l'inlandsis de l'Antarctique occidental avait progressé de plusieurs centaines de kilomètres vers le nord, s'approchant des montagnes et fermant l'embouchure des vallées, ce qui a ainsi rendu possible la formation de grands lacs. L'un d'entre eux, le lac glaciaire de Washburn, avait une profondeur d'au moins 300 mètres.

Dans les années 1990, Brenda Hall, géologue à l'université du Maine, aux États-Unis, a creusé dans les anciens sédiments situés en haut de la paroi de la vallée du lac de Washburn et a recueilli des morceaux de tapis d'algues qui y avaient poussé et qui étaient desséchés par le froid. Par datation au radiocarbone, la chercheuse a estimé que les algues – et donc le lac – dataient d'il y a 23 000 à 13 000 ans, à peu près au maximum de la dernière période glaciaire. Cette découverte a donné lieu à une curieuse controverse, selon Brenda Hall : on était conduit à penser que pendant la période glaciaire, « les glaciers fondaient probablement plus qu'ils ne le font actuellement ».

Les scientifiques se sont efforcés d'expliquer comment cela a pu se produire en dépit d'un climat plus froid. Selon l'une des théories, les océans environnants étaient plus largement recouverts de glace qu'ils ne le sont aujourd'hui – ce qui entraînait moins d'évaporation et donc moins de nuages, moins de chutes de neige et plus de rayonnement solaire atteignant les roches sombres des montagnes. Cela aurait provoqué une fonte plus importante en altitude. Cette fonte accrue se serait peut-être produite sur toute la longueur des montagnes, notamment là où l'on a découvert les *Tullbergia*.

Un phénomène étrange, que les scientifiques dénomment aujourd'hui « effet de serre à l'état solide », est étroitement lié à cette situation. La plupart des rayons du soleil qui frappent un glacier sont réfléchis par son extérieur enneigé. Mais dans les monts Transantarctiques, où des vents forts et secs évaporent lentement la neige et la glace, les glaciers ont souvent une glace profonde et relativement transparente exposée en surface. Le rayonnement solaire