



◀ *En juillet, dans la péninsule Antarctique, un morceau de glace de la taille de la Corse s'est détaché de la plateforme de glace flottante Larsen C.*

Climat

L'avenir incertain de l'Antarctique

Olivier Gagliardini, Gaël Durand, Fabien Gillet-Chaulet,

Institut des géosciences de l'environnement, à Grenoble

Grâce à un modèle numérique, Olivier Gagliardini et ses collègues ont quantifié l'état de santé actuel des plateformes flottantes bordant l'Antarctique, mais des incertitudes planent encore sur son avenir.

Plusieurs scénarios sont envisagés : l'Antarctique pourrait contribuer à élever le niveau de la mer jusqu'à un mètre en 2100.

Entre le 10 et le 12 juillet, un énorme morceau de glace, à peine plus petit que la Corse, s'est détaché de la plateforme de glace flottante Larsen C située dans la péninsule Antarctique. Un phénomène qui vient renforcer les inquiétudes autour du devenir de cette immense réserve d'eau douce dans un monde qui se réchauffe. Quelle sera l'influence de cet événement sur son avenir à court, moyen et

long termes ? Telle est la question à laquelle les scientifiques tentent de répondre. Il y a de quoi s'inquiéter : la fonte totale de l'Antarctique ferait monter le niveau des océans d'environ 60 mètres ! C'est le continent de tous les extrêmes : les plus basses températures enregistrées à la surface du globe (-92 °C, mesurée au centre du plateau de l'Antarctique de l'Est), les plus fortes épaisseurs de glace (qui peuvent atteindre 4 kilomètres), la plus faible densité de population (pas d'habitant permanent) ou les plus faibles

précipitations, ce qui en fait le plus grand désert du monde. À la surface, ces faibles précipitations neigeuses viennent nourrir l'énorme masse de glace qui s'écoule très lentement sur son socle, du centre vers les bords. Lorsqu'elle atteint ces bords et franchit le portail de la ligne d'échouage – qui sépare la partie posée de la partie flottante de la calotte –, elle se met à flotter sur l'océan. Elle contribue alors à modifier le niveau des mers. La perte de glace se fait par vêlage (*) d'icebergs, de tailles souvent moins spectaculaires que pour celui venant de se produire à Larsen C.

Comprendre l'évolution du niveau de la mer impose donc de comprendre ce que l'on appelle le bilan de masse de l'Antarctique : la différence entre les précipitations à la surface de la calotte ●●●



GLACIOLOGUES

Olivier Gagliardini (1), professeur à l'université Grenoble Alpes, Gaël Durand (2) et Fabien Gillet-Chaulet (3), chargés de recherche CNRS, étudient notamment la modélisation des écoulements glaciaires.

Contexte

L'Antarctique contribue à environ 12 % de la montée globale des océans. Dernièrement, la péninsule a perdu un iceberg de 5800 kilomètres carrés, suscitant de nouvelles inquiétudes sur son avenir. Grâce à la modélisation, les glaciologues essaient d'en anticiper les conséquences.

... et le flux de glace à la ligne d'échouage. Les précipitations sont intégrées sur toute la surface de l'Antarctique comme la somme des flux sortants. Elles représentent des volumes de glace énormes. De petites erreurs sur chacun d'eux rendent ainsi l'estimation de ce bilan difficile. Néanmoins, grâce à des mesures satellitaires reposant sur différentes techniques, nous savons aujourd'hui que l'Antarctique perd chaque année environ 160 km³ de glace et contribue à 12 % de la montée totale actuellement observée de 3,2 millimètres par an du niveau des mers (soit environ 0,4 millimètre par an).

En plus de vèler de magnifiques icebergs, les plateformes de glace flottantes situées sur toute la périphérie de l'Antarctique jouent un rôle mécanique important en retenant l'écoulement des glaciers émissaires en amont. Tel l'arc-boutant des constructions gothiques, ces plateformes constituent une barrière de sécurité sur tout le pourtour de l'Antarctique. On comprend alors que, si elles sont affaiblies par la diminution de leur taille ou de leur épaisseur, le flux à la ligne d'échouage sera augmenté. De même pour la vitesse de montée du

niveau des mers. À la suite de la perte de 10 % de sa surface totale, que deviendra Larsen C, et les dizaines de glaciers s'y jetant? De façon surprenante, ce spectaculaire événement n'aura que peu de conséquences à court terme! En effet, cet énorme iceberg flottait déjà. Aucune augmentation du niveau des mers n'est donc à prévoir. Cependant, en perdant plus de 10 % de sa surface, la plateforme Larsen C voit son front passer d'une forme convexe à une forme concave. Étant donné le contexte, il est très peu probable que les flux de glace en amont soient suffisants pour que ce front redevienne convexe.

Désintégration à venir

À moyen terme, cette forme concave laisse penser que la plateforme flottante Larsen C pourrait prendre la voie de ses voisins, Larsen A et B, dont la désintégration a été observée respectivement en 1995 et 2002, à la suite d'un changement similaire de la forme de leurs fronts. Larsen C subira probablement le même sort, mais il est difficile de dire à quelle échéance. C'était donc un départ discret, mais aux lourdes conséquences pour le voisinage!

(*) **Le vèlage** est la perte de fragments d'un glacier sous forme d'icebergs.

14 MILLIONS

DE KILOMÈTRES CARRÉS, c'est la superficie totale de l'Antarctique.

POUR EN SAVOIR PLUS

■ www.ige-grenoble.fr

Le site de l'Institut des géosciences de l'environnement

■ www.projectmidas.org

Le projet Midas, de l'université de Swansea, au Royaume-Uni.

■ elmerice.elmerfem.org

Le modèle Elmer/Ice.

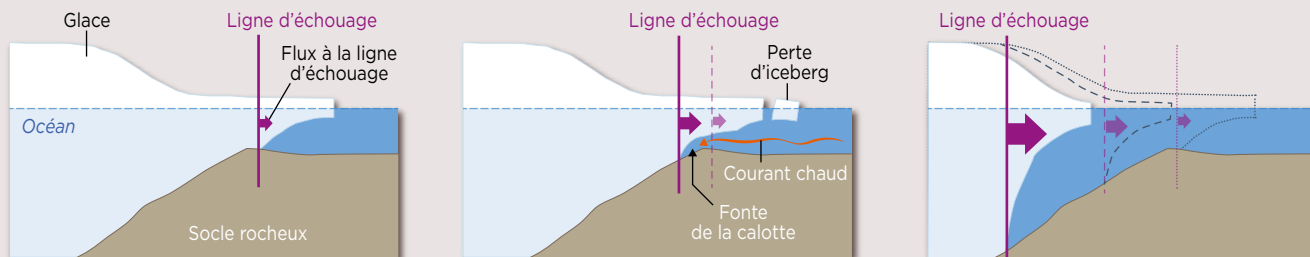
■ http://isskolen.dk/wp/?page_id=9894

Le changement climatique expliqué aux enfants.

À plus long terme, sa désintégration entraînerait la disparition des forces qu'il exerçait sur les glaciers émissaires; ceux-ci accélèrent. Conséquence: un flux plus important à la ligne d'échouage, et une contribution augmentée à la montée du niveau des mers. Cela a été observé en 2002 pour les glaciers retenus par Larsen B. Ainsi, les glaciers Hektor, Green et Evans ont vu leurs vitesses multipliées par 8 au moment de la désintégration de Larsen B (1), conduisant à une augmentation du flux de glace évacué à la ligne d'échouage de 2,7 km³ par an à 23,5 km³ par an.

Aujourd'hui, plus d'une décennie après la disparition de Larsen B, ces glaciers restent en déséquilibre et continuent de perdre de la masse. Alors faut-il s'inquiéter du devenir de Larsen C? En termes de montée du niveau des mers, la contribution cumulée maximale que pourrait apporter l'ensemble des glaciers de Larsen C restera faible, de l'ordre de deux centimètres. Mais la mort annoncée de Larsen C nous invite à regarder l'Antarctique dans sa globalité, et son gigantesque potentiel à faire monter le niveau des mers. Qu'en est-il des autres plateformes de glace autour de l'Antarctique?

Fig. 1 Les calottes glaciaires instables



1 La ligne d'échouage, séparant la partie posée de la calotte de la partie flottante, se situe à l'aval de la pente rétrograde du socle. Le flux à la ligne d'échouage est la quantité de glace qui passe cette ligne et flotte.

2 Une perturbation survient au niveau de la plateforme glaciaire. Cela peut être, par exemple, une perte d'iceberg ou une fonte sous-marine de la calotte.

3 Cela cause une perte de résistance de la plateforme et accélère le recul du glacier de façon auto-entretenue. La ligne d'échouage recule et le flux augmente, entraînant la hausse du niveau de la mer.

Sont-elles en bon état ? Sont-elles capables de résister à la poussée des glaciers émissaires qu'elles retiennent ? Et pour combien de temps ? Afin de répondre à ces questions, les scientifiques ont recours à des modèles numériques.

De plus en plus complets et complexes, ces outils permettent de reconstruire l'évolution passée des calottes polaires, de simuler leur état actuel ou de prédire leur évolution future. C'est le cas du modèle Elmer/Ice mis au point par plusieurs laboratoires dans le monde, dont le nôtre à l'Institut des géosciences de l'environnement (IGE), à Grenoble. Afin de mieux contraindre les paramètres physiques mal connus qui contrôlent l'écoulement, ces modèles sont aujourd'hui capables de se nourrir d'observations satellitaires – comme les vitesses de la glace en surface ou les changements d'élévation de la surface –, qui sont assimilées pour estimer notamment le frottement de la glace sur le socle, un paramètre important qui ne peut être observé directement.

Zones actives ou passives

Grâce à ces données, nous avons quantifié l'état de santé actuel de toutes les plateformes flottantes autour de l'Antarctique (2). Pour chacune d'elles, nous délimitons des zones dites « passives », dont la glace pourrait être supprimée sans causer de changements significatifs en amont. C'est le cas de l'iceberg qui vient de se détacher de Larsen C, puisqu'il se trouvait entièrement dans une zone passive. Au contraire, dans les zones dites « actives », un vêlage d'iceberg aura des conséquences immédiates en réduisant l'effet d'arc-boutant exercé par la plateforme sur les glaciers en amont. Le niveau des mers sera ainsi modifié. En moyenne, à l'échelle de l'Antarctique, cette barrière de sécurité représente 13,4 % de la surface

des plateformes flottantes, avec une répartition assez hétérogène sur tout son pourtour. Certains glaciers, tels Mertz et Drygalski, ont plus de la moitié de leur plateforme flottante constituée de glace passive et sont donc peu sensibles à leur changement de forme. Pour d'autres, ces zones passives sont quasi inexistantes, et tout changement de forme aura des conséquences importantes sur l'écoulement de la glace en amont. C'est notamment le cas des plateformes sur les mers d'Amundsen et de Bellingshausen. La modélisation que nous avons réalisée dresse un tableau de l'état actuel, mais ne permet pas d'estimer la contribution future de chacun de ces glaciers à la montée du niveau des mers. Ce travail nécessite de prendre en compte l'évolution des glaciers dans le temps, leur changement de forme, ainsi que le déplacement de la ligne d'échouage. Et cela en fonction de scénarios climatiques donnant l'évolution des températures et des précipitations à la surface de la calotte dans le futur, mais aussi l'évolution des températures des océans qui entourent l'Antarctique. Un exercice difficile aux multiples incertitudes.

Ainsi, dans le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) de 2013, la contribution de l'Antarctique à la montée des mers d'ici à 2100 représente environ 5 cm seulement sur une augmentation globale de 44 à 74 cm. Le Giec pointe toutefois que des contributions plus importantes ne peuvent être exclues, en particulier en lien avec une accélération de l'écoulement de la glace en Antarctique. Relativement faible, c'est sûrement une estimation prudente de la communauté devant la difficulté de l'exercice et l'état des connaissances d'alors. Des études plus récentes (3) montrent d'ailleurs que la contribution de l'Antarctique

TROIS MÉTHODES POUR UN MÊME CONSTAT

L'avènement des mesures par satellite a progressivement permis de déterminer le bilan de masse des calottes polaires. Aujourd'hui, trois méthodes indépendantes livrent le même constat : la péninsule Antarctique et le secteur des mers d'Amundsen et de Bellingshausen perdent de la glace et contribuent à augmenter le niveau de la mer. L'altimétrie, qui évalue les variations d'altitude de la surface de la calotte, a ainsi montré que les zones les plus proches de la côte des glaciers du secteur d'Amundsen s'amincissent de plusieurs mètres par an.

L'interférométrie, qui mesure la vitesse d'écoulement à la surface des glaciers et détermine la position de la ligne d'échouage, a révélé que la vitesse des glaciers du secteur d'Amundsen a approximativement doublé depuis les années 1970. Leur ligne d'échouage a également reculé, pour certains, de plus de 30 kilomètres entre 1992 et 2011. Enfin, la gravimétrie, qui détermine les changements de masse des calottes, montre une accélération de la perte de masse de l'Antarctique de l'Ouest au cours des quinze dernières années.

pourrait être bien plus importante à l'horizon 2100 (plus d'un mètre dans le pire des scénarios). Deux mécanismes d'instabilité pourraient substantiellement accélérer la décharge de glace vers l'océan.

Le premier est induit par la topographie du sol rocheux qui se situe sous la glace dans la zone d'échouage. En effet, pour être stable, la ligne d'échouage ne peut pas se situer durablement sur des pentes ascendantes dans le sens de l'écoulement du glacier. Or de nombreux glaciers ont leur ligne d'échouage située juste au sommet de telles pentes, et il suffit d'une petite perturbation pour que la ligne recule. Cela peut être une diminution de la capacité de la plateforme à contenir l'écoulement des glaciers en amont. C'est le cas dès qu'elles perdent de la glace dans une zone qui n'est pas « passive », soit par un vêlage d'iceberg, soit par la fonte qui se ●●



160
KM³

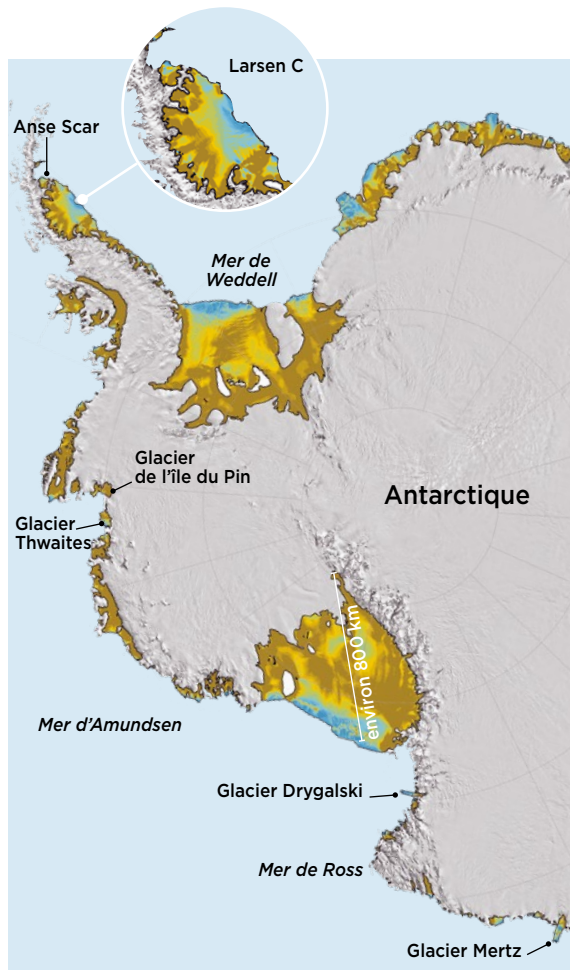
C'EST LE VOLUME de glace que perd chaque année l'Antarctique.

●●● produit dans les cavités, entre le fond marin et le plafond de glace des plateformes – un phénomène qui augmente avec la température de l’océan. Lorsque la capacité de résistance des plateformes de glace flottantes diminue, les glaciers en amont accélèrent et leur ligne d’échouage recule. Or, dans certains cas, cette dernière se trouve juste avant le sommet d’un relief. Si elle recule assez pour passer ce sommet et se retrouver dans la pente, elle va se mettre à reculer de façon auto-entretenu jusqu’à ce qu’elle arrive sur un relief descendant (dans le sens de l’écoulement). Le retrait de la ligne d’échouage entraînant une diminution de la partie posée de la calotte, le niveau de la mer va donc augmenter. Ce processus, envisagé au début des années 1970, a depuis été confirmé théoriquement, puis grâce à la modélisation numérique (Fig. 1).

Effet de seuil

Les glaciers donnant sur la mer d’Amundsen sont dans ce cas. Et nous avons vu que leurs plateformes flottantes n’avaient que très peu de zone passive. Pour le glacier de l’île du Pin, le plus gros contributeur actuel à la montée des mers en Antarctique (13 % de la contribution totale de l’Antarctique, soit 0,056 mm par an), nous pensons que cet état instable est déjà atteint (4). Il en serait de même pour le glacier Thwaites. Si ce processus était bel et bien engagé, une bonne partie de l’Antarctique de l’Ouest pourrait progressivement disparaître et élèverait alors le niveau de la mer de plus de trois mètres. Les probabilités d’un tel scénario, comme le rythme d’un éventuel retrait (du siècle à plusieurs millénaires), restent cependant incertaines.

Le second mécanisme d’instabilité à l’œuvre est l’effondrement brusque du front des plateformes de glace



▲ Dans la péninsule Antarctique, c’est sur la plateforme de glace flottante Larsen C que s’est produit un vêlage récent : celle-ci risque maintenant de se désintégrer.

flottantes. Dans l’hypothèse où un changement climatique important conduirait à l’occurrence répétée d’événements de fonte en surface, l’eau produite pourrait être à même de fracturer les plateformes de glace, ce qui exposerait des falaises de glace élevées de plus de 100 m au front des glaciers. Celles-ci rompraient vraisemblablement sous leur propre poids. Cela entraînerait progressivement l’effondrement de la partie posée.

Dans un tel scénario, l’Antarctique contribuerait à lui seul à élever le niveau de la mer d’un peu plus d’un mètre en 2100. En conséquence, le retrait de la calotte polaire se trouverait substantiellement accéléré

et l’Antarctique contribuerait alors à élever le niveau de la mer de plus de 15 mètres en 2500. À cette échéance, non seulement la partie ouest de l’Antarctique se serait entièrement démantelée, mais de larges secteurs à l’est du continent se seraient largement retirés. Pour qu’un tel scénario catastrophique vienne à se réaliser, il faudrait que la fonte à la surface des zones côtières Antarctique devienne régulière et importante, ce qui n’est envisagé que pour les scénarios d’émissions de gaz à effet de serre les plus pessimistes.

Nous sommes donc vraisemblablement devant des mécanismes à effet de seuil. Une perturbation supplémentaire mène à un effet d’emballement qui peut modifier la topographie d’un continent entier, affecter l’ensemble des zones côtières de la planète. Les conséquences sur l’ensemble du système climatique restent aujourd’hui largement inconnues. Combien de temps ce système résistera aux perturbations avant que ces changements irrévocables ne se mettent en place ? Cela reste une question de recherche hautement débattue et sans réponse claire. Une certitude : plus les changements que l’humanité impose à notre climat seront importants, plus grandes seront les chances de voir l’Antarctique se retirer brutalement. Quant au vêlage récent de Larsen C, il faut voir cet événement spectaculaire comme une mise en garde du continent Antarctique si rien n’est fait pour limiter notre propension à dérégler la machine climatique. ■

English
version

Cet article,
traduit en anglais,
est à lire sur
researchinfrance.com

(1) E. Rignot et al., *Geophysical Research Letters*, doi:10.1029/2004GL020697, 2004.

(2) J.J. Fürst et al., *Nature Climate Change*, doi:10.1038/nclimate2912, 2016.

(3) C. Ritz et al., *Nature*, 528, 115, 2015 ; R.M. De Conto et David Pollard, *Nature*, 531, 591, 2016.

(4) L. Faviet et al., *Nature Climate Change*, doi:10.1038/nclimate2094, 2014.