



> caractéristiques de la glace de mer *in situ*, de développer une représentation fiable de ce matériau et de réexaminer les simulations numériques. C'est ce qui a motivé notre participation à l'expédition dans l'océan Antarctique en 2017.

Durant le voyage, un premier volet de recherche sur la glace de mer a concerné les images satellitaires et leur interprétation. Les climatologues utilisent ces images prises de l'espace pour estimer la quantité de glace de mer présente à tout moment. Cependant, nous n'avions que des correspondances approximatives entre l'état réel de la glace (sa densité ou la taille moyenne des crêpes) et les niveaux de gris sur les océans des images satellitaires. Pour y remédier, lors de notre expédition, il y avait en permanence deux personnes sur la plateforme d'observation du bateau pour recenser la glace de mer. Des caméras filmaient aussi l'océan, et une personne était chargée de changer les batteries toutes les heures, car leur autonomie est drastiquement réduite à cause du froid (avec des températures ressenties d'environ -20°C) : une opération très dangereuse, avec un risque non négligeable d'être emporté par-dessus bord à cause d'une vague déferlante ! Ce travail d'observation de la glace de mer a permis d'améliorer l'interprétation des données satellites qui sont ensuite exploitées dans les modèles prévisionnels.

Notre équipe s'est aussi appliquée à mesurer les propriétés de la glace de mer,

notamment sa compressibilité et sa résistance aux forces de torsion. En effet, parce qu'elle se forme en agglomérant des cristaux de glace, la crêpe de glace est poreuse, c'est-à-dire qu'elle présente des pores contenant soit de l'eau, soit de l'air. Dès lors, le matériau est compressible. Sous l'effet d'une force, les cristaux se réarrangent et combinent les pores dans un premier temps. Le bloc de glace se déforme. Mais si la force continue d'être appliquée, il se brise. Nous voulions modéliser de façon réaliste la structure de la crêpe de glace et son comportement.

Pour cela, nous avons d'abord « pêché » des crêpes à l'aide d'un panier suspendu à une grue, une opération délicate qui a nécessité de nombreuses tentatives et plusieurs nuits afin de collecter assez de glace : malgré la mer agitée,

Pour déposer des bouées afin de suivre la dérive de la glace en fonction des courants marins ou faire des prélèvements, les chercheurs descendent du navire grâce à une grue (à gauche). Les carottes de glace sont analysées directement sur le bateau dans des conditions de stabilité qui ne sont pas toujours idéales (à droite).

À la fois compressible et viscoélastique, la glace est difficile à modéliser

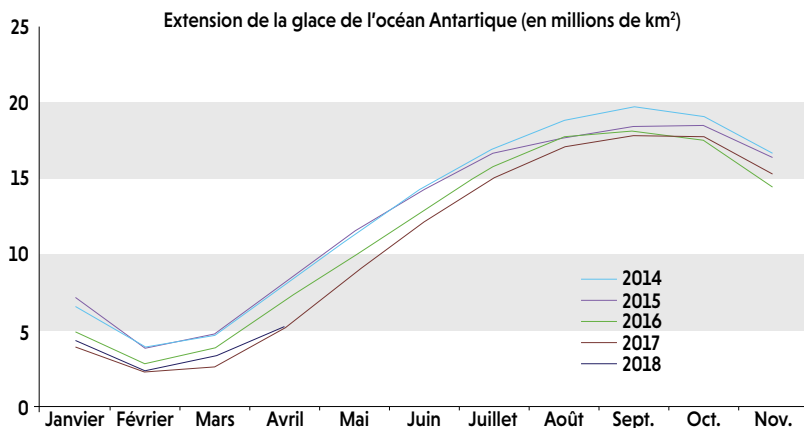
il fallait faire attention à ne pas cogner et endommager la coque du bateau. Ensuite, nous avons foré ces blocs, pour y prélever des carottes de glace uniformes (des cylindres de glace), une manipulation particulièrement acrobatique. Avec le bateau toujours en mouvement et ballotté par une mer parfois hostile, il fallait s'y mettre à plusieurs et tenir la personne réalisant l'opération de forage pour la stabiliser au maximum.

Ensuite, il fallait réaliser le test de torsion qui consiste à exercer une force de torsion sur une carotte de glace suivant l'axe du cylindre. Le matériau est alors soumis à une contrainte de cisaillement qui est nulle au centre du cylindre et maximale sur le bord. Pour une force appliquée donnée (plus précisément un moment de torsion), le cylindre se déforme d'autant plus qu'il est mou et compressible. Et il se casse plus ou moins rapidement en fonction de la déformation. En réalisant ce test sur un grand nombre d'échantillons, nous avons déterminé les caractéristiques mécaniques des crêpes de glace, en particulier le paramètre de fracture.

UNE NOUVELLE APPROCHE NUMÉRIQUE

Forts de ces données, nous les avons utilisées pour modéliser la glace de mer. Or ce matériau n'est pas seulement compressible, il présente, comme les glaciers, des caractéristiques viscoélastiques : à la fois visqueux (un comportement fluide qui résiste à un écoulement) et élastique (comportement solide de déformation réversible sous une contrainte). Les équations (aux dérivées partielles) qui décrivent un matériau présentant ces propriétés sont complexes. Il est donc impossible d'obtenir des solutions exactes et simples qui permettent de décrire le comportement de la glace.

Seul moyen : utiliser des approximations numériques pour résoudre ce type d'équations, comme la méthode des éléments finis, très souvent utilisée pour étudier des matériaux (pour résoudre les équations de diffusion de la chaleur, les équations de Maxwell pour étudier un champ électromagnétique, ou des équations qui décrivent les déformations mécaniques d'un objet). Son principe consiste à diviser l'objet d'étude en un nombre fini de petits volumes, des polyèdres nommés ici éléments finis. Leur petite taille permet alors de faire, dans chacun d'eux, des approximations permettant de résoudre les équations et d'obtenir une solution approchée du problème. Comme il y a un nombre fini de polyèdres, et donc un nombre fini d'équations pour cette approximation, il est possible de résoudre numériquement le problème avec un ordinateur. Il faut cependant s'assurer de la cohérence des résultats, par exemple, en vérifiant la continuité des



L'extension de la glace de mer en Antarctique atteint son minimum en février (la belle saison australe). Entre 2014 et 2018, la quantité de glace tend à diminuer.

résultats d'un polyèdre à ses voisins. Des outils mathématiques quantifient l'erreur maximale commise par l'approximation, même sans connaître la solution exacte. On doit aussi s'assurer que si l'on prenait des polyèdres de plus en plus petits, la solution approchée doit converger vers une solution cohérente.

Jusqu'à présent, les algorithmes utilisés pour étudier une mer de glace calculaient d'abord les déplacements des cristaux de glace dans l'eau à l'aide de la méthode des éléments finis, puis les tensions mécaniques au sein des agglomérations de cristaux étaient reconstituées dans un second temps. Par cette méthode, les approximations dans le calcul des déplacements se reportaient dans l'estimation des tensions, où elles pouvaient vite devenir importantes et fausser le résultat. Or il est clair que ces tensions jouent un rôle important dans la formation de la glace et son évolution.

Nous avons donc développé de nouveaux outils mathématiques qui reposent sur la méthode des moindres carrés, qui consiste à minimiser les erreurs. En outre, notre approche évalue simultanément les tensions et les déplacements dans les équations aux dérivées partielles du problème. Grâce aux données recueillies lors de notre expédition et ces outils, nous avons réalisé une simulation qui décrit comment des cristaux de glace dans la mer évoluent dans un système incluant des vents et des courants marins. Résultat : la modélisation des tensions dans la glace est meilleure que dans les approches précédentes.

Notre modèle reste à enrichir pour se rapprocher le plus possible des conditions réelles. Puis, si le modèle est validé, il restera à travailler avec des climatologues pour voir comment la glace de mer contribue à la dynamique globale dans le contexte du réchauffement climatique. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. Bertrand, **Least-squares finite element method for sea-ice dynamics**, en ligne le 5 septembre 2018. <https://arxiv.org/abs/1809.01344>

V. Masson-Delmotte, **La fonte de l'Antarctique s'accélère**, *Pour la Science*, n° 490, août 2018.

A. Orsi, **Mille ans de variations climatiques en Antarctique**, *Pour la Science*, n° 458, décembre 2015.