

> chocs répétés, ces larges morceaux de glace se remodelent avec des bords plus épais, et prennent une forme quasi circulaire, de 30 centimètres à 3 mètres de diamètre, d'où leur nom de *pancakes* en anglais, de *blinis* en russe ou de crêpes de glace (voir la photo page 67 et ci-contre).

Cette glace de mer contribue à la cryosphère, la partie du globe qui est recouverte par de la neige ou de la glace. Ces régions réfléchissent vers l'espace plus de 70% du rayonnement solaire qu'elles reçoivent. Ce pouvoir réfléchissant, c'est-à-dire le rapport de l'énergie réfléchie à l'énergie lumineuse incidente est nommé l'albédo. Par comparaison, l'albédo de la mer est de seulement 10%, de 10 à 25% pour la végétation, de 10 à 20% pour la roche, etc. L'albédo moyen de la Terre, toutes surfaces confondues est de 30%. En renvoyant de façon efficace le rayonnement solaire, la cryosphère contribue à réguler la température de la planète. L'albédo influe aussi sur la météo, c'est-à-dire sur les variations à court terme des conditions atmosphériques: comme il influe sur l'ensoleillement reçu, il contribue au gradient thermique qui agit sur la circulation générale de l'atmosphère.

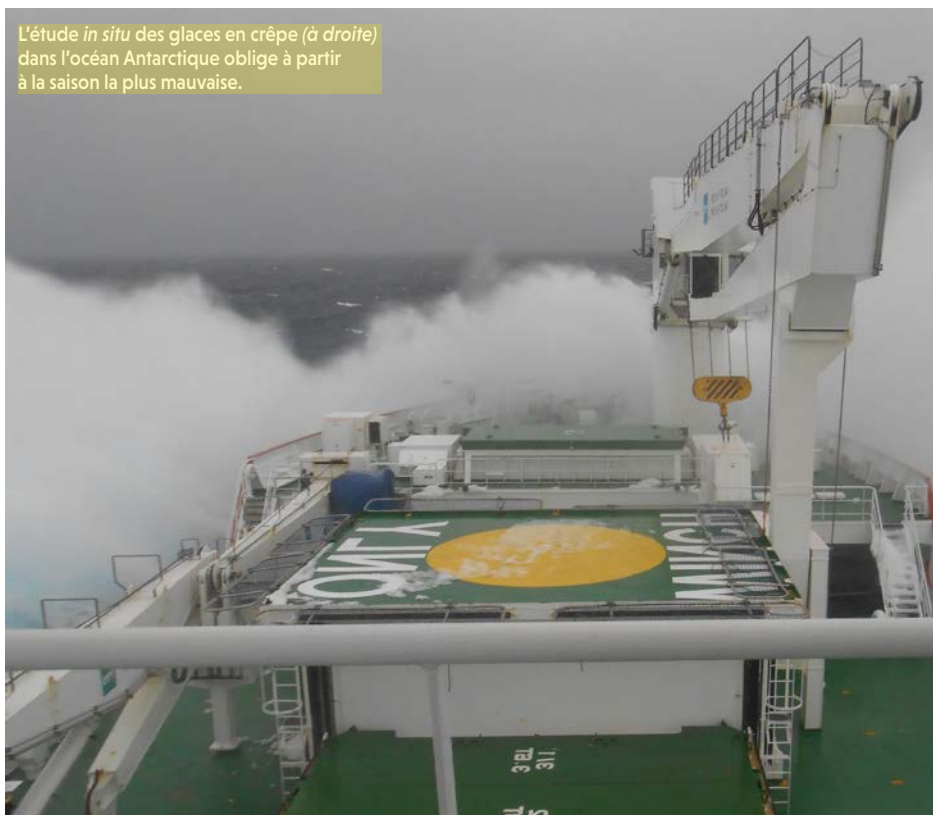
UN RÔLE IMPORTANT DANS LE CLIMAT ET LA MÉTÉO

Pour produire des prévisions météorologiques (à court terme) ou climatique (à long terme) les plus fiables possible, les modèles numériques doivent intégrer une description la plus précise possible de la cryosphère: quelles régions sont couvertes par de la neige et de la glace et à quelle période de l'année? La réponse est complexe car elle varie d'une région à une autre et présente une forte dépendance saisonnière. En moyenne, les surfaces englacées ou enneigées représentent, entre 40 et 85 millions de kilomètres carrés, soit entre 7 et 17% de la surface de la Terre.

Certaines de ces surfaces sont étudiées depuis longtemps, c'est le cas des glaciers. À partir des années 1950, les climatologues ont commencé à s'intéresser à la banquise arctique, aux calottes polaires (du Groenland et de l'Antarctique) et aux pergélisols (des sols gelés de façon permanente). L'étude de la glace de mer a commencé plus récemment, et les propriétés mécaniques de cette vaste couche de glace, très peu étudiée *in situ*, restent encore assez méconnues. Les données sont d'autant plus lacunaires que la glace n'est que rarement permanente et a une évolution saisonnière importante: l'Antarctique perd quasiment toute sa glace de mer pendant la belle saison (l'été austral, c'est-à-dire de décembre à février), tandis que l'Arctique voit sa superficie réduite de moitié entre l'été et l'hiver.

La glace de mer se forme à partir de février en Antarctique et fond dès le mois d'octobre.

L'étude *in situ* des glaces en crêpe (à droite) dans l'océan Antarctique oblige à partir à la saison la plus mauvaise.



À l'inverse, elle se forme à partir d'octobre en Arctique. Ainsi, on estime qu'il y a toujours au moins 19 millions de kilomètres carrés d'océans couverts par de la glace de mer, avec un pic à 27 millions de kilomètres carrés en novembre chaque année.

Cependant, dans le contexte du réchauffement climatique, ces valeurs moyennes évoluent à la baisse. On observe par exemple que, depuis 2015, l'extension maximale de la glace en Arctique a été environ 10% moins importante que la valeur moyenne calculée entre 1981 et 2010, soit près de 1,2 million de kilomètres carrés (environ deux fois la superficie de la France). De la même façon, avec environ 6 millions de kilomètres carrés, l'extension minimale (en septembre, à la fin de l'été) est 25% plus faible que ce qu'elle a été. On observe des tendances similaires en Antarctique (voir la figure page 71).

Il existe cependant une différence majeure entre l'océan Arctique et l'Antarctique, qui influe sur la formation de la glace de mer. Le premier est un océan quasi fermé, entouré de terres proches, tandis que le second est ouvert. Cela implique que les courants sont plus faibles pour l'Arctique que dans l'océan austral: la glace de mer s'agglomère plus facilement et les blocs formés se fixent les uns aux autres. La modélisation de son expansion est alors simplifiée. Par ailleurs, la proximité des côtes a facilité l'étude de la glace de mer arctique, qui a débuté dans les années 1950 et qui était aussi



motivée par son impact sur l'économie (le passage des bateaux, l'accès à certaines ressources sous-marines de gisements de gaz et de pétrole). En revanche, l'étude de la glace de mer en Antarctique n'était pas une priorité, pour trois raisons principales. D'abord, sa présence n'était pas un obstacle pour les routes maritimes. Ensuite, la région est très difficile d'accès, surtout pendant la mauvaise saison, justement quand la glace se forme. Enfin, on a longtemps pensé que cette glace avait des propriétés semblables à celle de l'Arctique. En réalité, les différences sont importantes car la glace de mer en Antarctique est exposée à des vents et des courants marins bien plus forts. Ces mouvements influent le processus de

formation de la glace en mer, et donc sur certaines caractéristiques comme la densité ou la porosité et donc sur sa résistance mécanique. Ainsi, si ces crêpes sont poussés par le vent vers les côtes, elles s'y accumulent et sous la pression finissent par se briser. Ce phénomène de fracturation participe à la dynamique globale de la glace de mer. Mais, comment la résistance aux forces mécaniques varie-t-elle exactement entre la glace arctique et antarctique?

Avec la prise de conscience du dérèglement climatique récent, les travaux de modélisation en Antarctique ont sérieusement commencé. La recherche a d'abord concerné l'inlandsis de l'Antarctique (environ 14 millions de kilomètres carrés autour du pôle Sud), c'est-à-dire la glace recouvrant la terre ferme, puis les travaux se sont étendus au cas de la glace de mer.

Cette dernière est aujourd'hui intégrée dans les modèles climatiques mais de façon très simplifiée. En 2008, Ron Kwok, à l'institut de technologie de Californie, et ses collègues ont montré qu'il y avait des différences significatives entre les simulations de glace de mer et les observations par satellite. Il n'était cependant pas clair si ces problèmes venaient d'une modélisation imparfaite de la glace ou des approximations numériques des simulations. Nous manquons de données sur les propriétés de ces crêpes de glace pour en établir une représentation plus réaliste. Il y avait donc un besoin manifeste de mesurer les >

À l'échelle du globe,
la glace de mer recouvre
entre 19 et 27 millions
de kilomètres carrés



> 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 combler 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