

LE MOTEUR DE LA « POMPE » OCÉANIQUE — FORMATION DE L'EAU DENSE EN ANTARCTIQUE

Kay I. Ohshima^{1*} et Sienna Blanckensee^{2*}

¹Institut des Sciences des basses températures, Université Hokkaido, Sapporo, Japon

²École de l'Environnement, Université du Queensland, Brisbane, QLD, Australie

L'océan est constitué de plusieurs couches. La couche d'eau la plus lourde (la plus dense) au fond de l'océan est appelée Eau Antarctique Profonde (EAP). L'EAP se forme sur la côte autour du continent Antarctique dans des zones où une grande quantité de banquise est produite en raison des températures glaciales et des vents forts. Lorsque la banquise se forme, la majeure partie du sel contenu dans l'eau de mer n'est pas pris dans la glace ; l'eau située sous la banquise devient très salée et froide ce qui la rend lourde et dense. Cette eau dense s'enfonce au fond de l'océan et devient l'EAP. Ce mouvement agit comme une pompe et alimente la circulation des eaux océaniques dans le monde entier. Avec le changement climatique, le réchauffement des températures et la fonte des glaces influenceront la formation de l'EAP, ce qui pourrait affecter, au niveau mondial, les courants océaniques, le climat, ainsi que les plantes et les animaux vivant dans les océans et sur la terre ferme.

DENSITÉ. Rapport entre la masse d'un corps et celle d'un même volume d'eau. En ce qui concerne l'eau, des températures plus froides et une teneur en sel plus élevée la rendent plus dense.

Nous pouvons considérer l'océan comme un gâteau à plusieurs couches : l'eau de surface, l'eau intermédiaire et, au fond, l'eau abyssale. Les couches de l'océan ont toutes une **densité** différente, l'eau la plus lourde (la plus dense) se trouvant au fond. La densité de l'eau varie en fonction de sa température et de la quantité de sel qu'elle contient. L'eau chaude est moins dense que l'eau froide, et

l'eau salée est plus dense que l'eau douce. Par exemple, si tu mets de la sauce soja dans de l'eau, elle coule au fond car elle a une concentration en sel plus élevée et est donc plus dense. Dans l'océan, lorsque des couches d'eau dense et d'eau moins dense sont en contact, l'eau la plus dense s'enfonce sous l'eau la moins dense (**Figure 1**, en bas à gauche). L'eau dense au fond de l'océan est très froide et/ou très salée. Mais comment ces couches se forment-elles ?

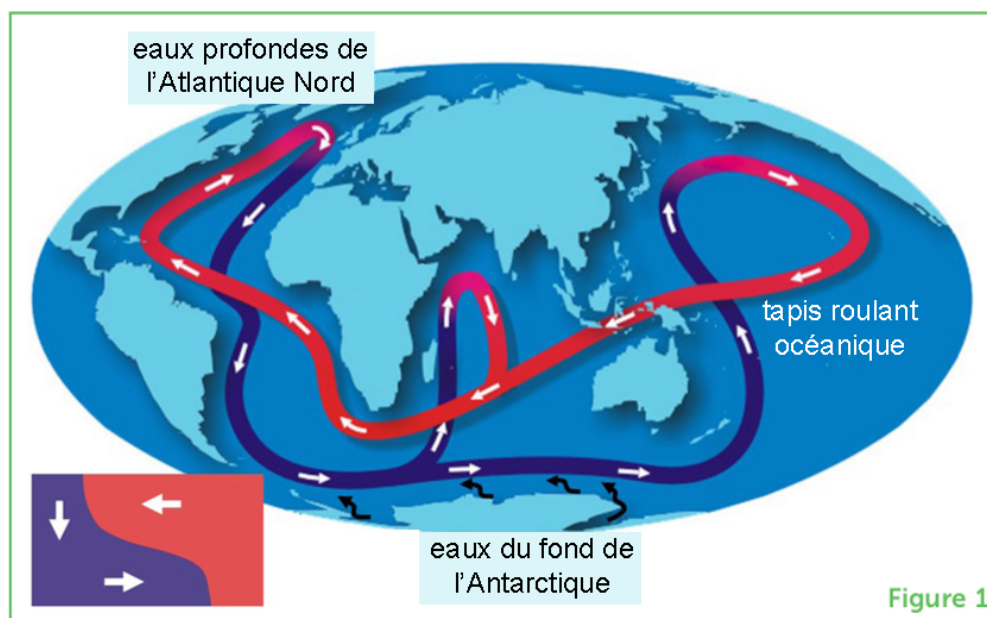


Figure 1

Figure 1. L'eau se déplace dans les océans du monde entier sur une sorte de "tapis roulant" ; ce phénomène est appelé circulation océanique globale. Le violet indique le courant profond froid au fond de l'océan et le rouge le courant de surface plus chaud. L'eau plus froide et plus dense (salée) s'enfonce sous l'eau plus chaude et plus légère et la chasse (encadré à gauche). Les eaux froides et denses du fond se forment à deux endroits, l'un autour de l'Antarctique et l'autre près de l'Arctique (figure modifiée d'après la NOAA et la NASA).

FORMATION DES EAUX DENSES ANTARCTIQUES PROFONDES

L'eau dense du fond de l'Antarctique (**EAP**) se forme autour du continent Antarctique et se trouve juste au-dessus du plancher océanique. C'est l'eau la plus dense de l'océan. Si on pesait la masse globale des océans, elle représenterait 30 à 40 % du volume total [1].

Pourquoi les eaux océaniques les plus denses se trouvent-elles dans le fond de l'Antarctique ? Dans l'Antarctique, les eaux de la surface de l'océan sont fortement refroidies et gelées au contact de l'air froid et sous l'action du vent, ce qui entraîne la formation d'une grande quantité de **banquise**. Quand l'eau est douce, la glace se forme à 0°C (comme la glace de ton congélateur), mais l'eau de l'océan contient du sel et doit donc atteindre -1,9°C pour geler. Lorsque l'eau de mer gèle, 70 à 90 % du sel qu'elle contient est expulsé de la glace et l'eau située dessous est donc très salée et très dense ; elle s'enfonce dans l'océan.

DES USINES À BANQUISE PRÈS DE LA CÔTE ANTARCTIQUE

La banquise se forme tout autour du continent Antarctique, mais il faut

EAP (EAU ANTARCTIQUE PROFONDE). Couche d'eau océanique très froide et salée, donc très lourde/dense et qui se trouve sur le plancher de l'océan antarctique.

BANQUISE. Glace formée à partir de l'eau de mer autour de l'Antarctique et de l'Arctique.

POLYNIE. Zone d'eau libre ou de glace mince entourée de banquise et de terres qui produit beaucoup de banquise poussée par le vent vers l'océan ce qui maintient la polynie.

des quantités énormes de banquise pour que l'eau soit suffisamment salée pour produire l'EAP. Une fois que la banquise devient épaisse et recouvre la surface de l'océan, elle protège de l'air froid l'eau qui se trouve en dessous et empêche la formation de nouvelle banquise. Ce phénomène s'apparente aux plumes des manchots qui les gardent au chaud. Cependant, il y a des régions autour de l'Antarctique où la banquise se forme en permanence : ce sont les **polynies** côtières.

Une polynie est une zone océanique libre de glace et entourée par la banquise (**Figure 2**). Les vents forts qui soufflent du continent éloignent la banquise du littoral et créent une zone d'eau libre. Cette eau nouvellement exposée gèle rapidement. Mais même si une nouvelle banquise se forme, les courants océaniques ou les vents forts l'éloignent de la côte, exposant ainsi davantage d'eau libre à la surface et maintenant la polynie. En raison de la grande quantité de banquise que créent les polynies, ces dernières sont souvent appelées "usines à banquise" [2].

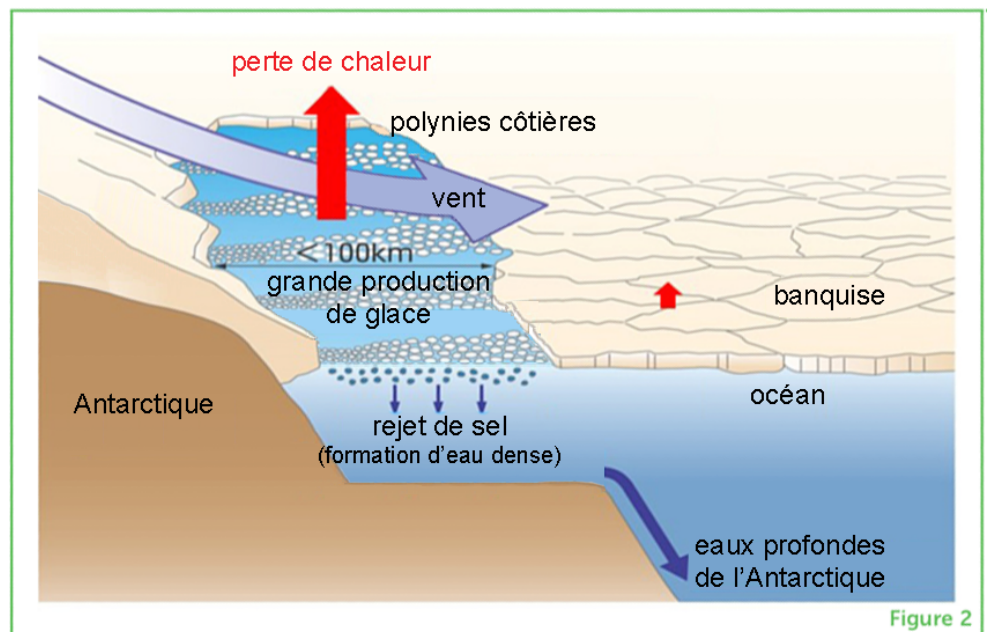


Figure 2

Figure 2. Les polynies côtières sont appelées "usines à banquise", car elles en créent beaucoup. Lorsque la banquise nouvellement formée est emportée par des vents et des courants forts, elle met à nu une masse d'eau exposée à l'air libre et froid ; cette eau gèle et produit une nouvelle banquise que les vents et les courants éloignent de la côte. Et le cycle continue ! La grande production de glace s'accompagne d'une perte de chaleur et du rejet de sel dans l'eau de mer qui devient plus dense et s'enfonce vers le fond pour constituer l'EAP. Figure modifiée d'après [2]).

Avec la formation d'une grande quantité de glace, l'eau située sous les polynies devient très salée en raison du rejet de sel, et très froide, ce qui rend cette eau extrêmement lourde et dense. Cette eau dense s'enfonce au fond de l'océan pour devenir l'EAP !

OBSERVATION PAR SATELLITE

Il existe de nombreuses polynies autour de l'Antarctique, mais toutes ne produisent pas suffisamment de banquise pour générer l'EAP. Les

**OBSERVATION
SATELLITE.** PAR
Collecte
d'images et d'autres
données sur la Terre à partir
de satellites lancés dans
l'espace autour de la Terre.

zones côtières de l'Antarctique sont un des endroits du monde les plus difficiles d'accès, surtout en hiver quand il faut traverser l'épaisse banquise pour se rendre dans les polynies et étudier leur formation. Heureusement, nous disposons d'un outil précieux qui nous aide à mesurer la production de banquise sans nous déplacer : **l'observation par satellite**.

Les satellites lancés dans l'espace observent la surface de la Terre à distance, à l'aide de caméras et d'autres capteurs. Cette observation se fait tout au long de l'année et nous permet de localiser les polynies et de mesurer la quantité de chaleur qu'elles perdent (**Figure 2**). Ensuite, à l'aide d'ordinateurs et de mathématiques, nous pouvons calculer la quantité de banquise produite par chaque polynie (plus la perte de chaleur est grande, plus la production de banquise est importante).

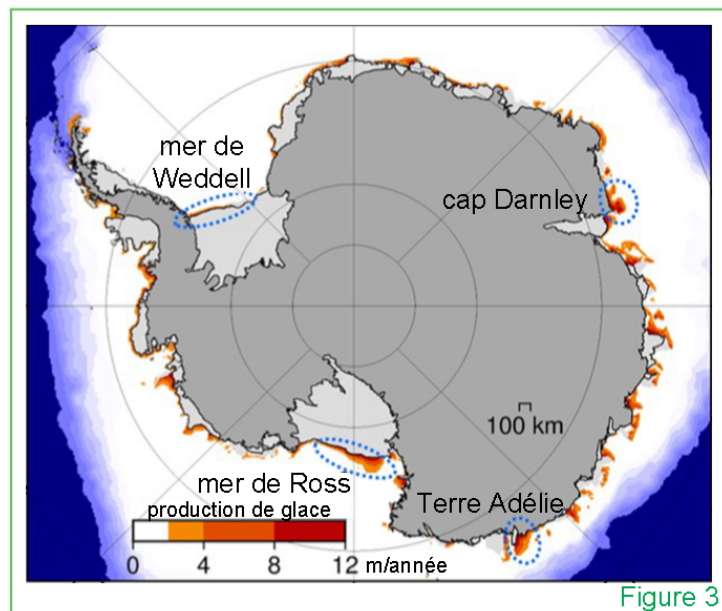


Figure 3

Figure 3. Carte de la production annuelle de banquise et d'EAP autour de l'Antarctique. La zone de banquise est représentée en blanc, et on peut voir la quantité de nouvelle banquise produite près des côtes, dans les polynies côtières. Les polynies côtières entourées de pointillés bleus sont celles qui produisent suffisamment de banquise pour générer l'EAP (modifié d'après [5]).

La **Figure 3** présente une carte de la production annuelle de banquise sur l'ensemble de l'océan Antarctique (carte créée à partir de données satellitaires). Les zones de forte production de banquise se trouvent près de la côte, mais seuls quatre endroits en produisent suffisamment pour générer l'EAP. Entre 1940 et 1990, les scientifiques ont découvert que les polynies de la mer de Ross, de la mer de Weddell et de la côte de la Terre d'Adélie produisaient l'EAP. Ces découvertes ont été faites lors d'explorations scientifiques dans l'Antarctique, par des études directes de l'océan profond. Ce n'est qu'avec le développement de la technologie satellitaire dans les années 2000 que l'on a vu que le quatrième site — le cap Darnley — produisait également l'EAP [3, 4].

CIRCULATION OCÉANIQUE MONDIALE. Mouvement des eaux océaniques autour du globe dû aux différences de densité des masses d'eau de l'océan.

Cela a ensuite été confirmé par les données recueillies à partir d'un navire de recherche [3].

CIRCULATION OCÉANIQUE MONDIALE

Reporte-toi à la **Figure 1** qui illustre la **circulation océanique mondiale**, parfois appelée "tapis roulant océanique". Le mouvement de l'eau est déterminé par les différences de densité des masses d'eau océaniques. L'enfoncement des eaux denses vers le fond de l'océan Antarctique formant l'EAP agit comme une pompe, envoyant ces eaux denses et froides vers l'équateur et les eaux chaudes de l'équateur vers les pôles. Cette circulation permet de mieux répartir la chaleur et de maintenir un climat doux et stable dans le monde entier. Même si l'EAP se forme dans l'Antarctique, on la retrouve au fond de l'océan près de l'équateur. Ces eaux froides du fond de l'océan remontent progressivement dans d'autres régions du monde. En moyenne, il faut à l'eau entre 1 000 et 2 000 ans pour parcourir l'ensemble du tapis roulant océanique [6].

LE FUTUR

Au cours des 100 dernières années, la température de l'atmosphère a augmenté en raison de l'activité humaine, ce qu'on appelle le réchauffement climatique. L'océan a absorbé 90 % de cette chaleur et la couche inférieure de l'océan se réchauffe également [7]. Les scientifiques ont montré que le réchauffement de la couche inférieure de l'océan est dû à la réduction de formation d'EAP [7]. La fonte des glaces du continent antarctique, la plus grande masse de glace sur Terre, rend l'océan autour de l'Antarctique moins salé, et cela diminue la densité de l'eau. À mesure que le réchauffement climatique se poursuit, on prévoit que la production d'EAP diminuera encore plus, ce qui pourrait affaiblir et ralentir le « tapis roulant » océanique mondial. Si la circulation océanique mondiale devait ralentir ou s'arrêter, le climat de la Terre changerait et les écosystèmes océaniques et terrestres seraient affectés. Nous ne savons pas ce qu'il adviendrait de la circulation océanique, du climat et des écosystèmes si l'EAP cessait de se former, et les scientifiques utilisent la modélisation informatique tenant compte de l'océan et du climat pour tenter de le prédire. Notre compréhension de cette masse d'eau continue à s'améliorer et peut-être pourrais-tu un jour nous aider à ces recherches et à explorer ce que nous ne savons pas de la mer profonde.

REMERCIEMENTS

KO remercie le Ministère japonais de l'éducation, de la culture, des sports, de la science et de la technologie pour le soutien qu'il lui a apporté par des subventions pour ses recherches (20H05707). SB remercie l'Australian Research Council Discovery Project Grant

(DP220102525) pour son soutien financier.

RÉFÉRENCES

- [1] Johnson, G. C. 2008. Quantifying Antarctic bottom water and north Atlantic deep water volumes. *J. Geophys. Res.* 113:C05027. doi: 10.1029/2007JC004477
- [2] Morales Maqueda, M. A., Willmott, A. J., and Biggs, N. R. T. 2004. Polynya dynamics: a review of observations and modeling. *Rev. Geophys.* 42:RG1004. doi: 10.1029/2002RG000116
- [3] Ohshima, K. I., Fukamachi, Y., Williams, G. D., Nihashi, S., Roquet, F., Kitade, Y., et al. 2013. Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya. *Nat. Geosci.* 6:235–40. doi: 10.1038/NGEO1738
- [4] Ohshima, K. I., Fukamachi, Y., Ito, M. K., Nakata, M., Simizu, D., Ono, K., et al. 2022. Dominant frazil ice production in the Cape Darnley polynya leading to Antarctic Bottom Water formation. *Sci. Adv.* 8:eadc9174. doi: 10.1126/sciadv.adc9174
- [5] Nihashi, S., and Ohshima, K. I. 2015. Circumpolar mapping of Antarctic coastal polynyas and landfast sea ice: relationship and variability. *J. Climate.* 28:3650–70. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00369
- [6] Matsumoto, K. 2007. Radiocarbon-based circulation age of the world oceans. *J. Geophys. Res.* 112:C09004. doi: 10.1029/2007JC004095
- [7] Rhein, M., Rintoul, S. R., Aoki, S., Campos, E., Chambers, D., Feely, R. A., et al. 2013. "Observations: ocean," *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., et al. (eds.). Cambridge: University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535.

VERSION FRANÇAISE

Cet article d'accès libre est une traduction avec modifications d'un article publié par Frontiers for Young Minds (doi : 10.3389/frym.2023.1057990 ; Ohshima K and Blanckensee S (2023) Driving the Ocean "Pump" - Formation of Dense Water in the Antarctic. *Front. Young Minds.* 11:1057990).

TRADUCTION : Nicole Pasteur, Association Jeunes Francophones et la Science

ÉDITION : Catherine Braun-Breton, Association Jeunes Francophones et la Science

MENTOR SCIENTIFIQUE : Daniel Breton, Association Jeunes Francophones et la Science

REMERCIEMENTS : Merci à Josselin Gély et Romain Blanc pour leur accueil et leur implication dans l'édition de cet article par leurs élèves.

JEUNES ÉDITEURS :

TRISTAN, 13 ANS

Je m'appelle Tristan j'ai 13 ans et j'habite à Montpellier. J'aime les jeux vidéo et la biodiversité. Je fais du sport et je joue au rugby. Je suis allé voir la finale de la coupe du monde de rugby : Nouvelle Zélande contre Afrique du Sud. C'est l'Afrique du Sud qui a gagné !

SALAH, 13 ANS

Je m'appelle Salah, j'ai 13 ans, j'habite à Montpellier. L'édition de cet article et d'en discuter avec un scientifique m'ont beaucoup intéressé.

KELVIN, 13 ANS

Salut je m'appelle Kelvin et j'ai 13 ans J'aime les jeux vidéo. Je fais du padel et du basket. J'ai deux chats nommés Smoky et Tigrou.

ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)

SOUMIS le 30 septembre 2022 ; **ACCEPTÉ** le 10 août 2023

PUBLIÉ EN LIGNE le 7 septembre 2023.

ÉDITEUR : Marilyn Raphael

MENTORS SCIENTIFIQUES : Soumya Kini, Stephanie Nebel, Juliana Ruzante

CITATION : Ohshima K and Blanckensee S (2023) Driving the Ocean "Pump"—Formation of Dense Water in the Antarctic. *Front. Young Minds*. 11:1057990. doi: 10.3389/frym.2023.1057990

DÉCLARATION DE CONFLIT D'INTÉRÊTS

Les auteurs déclarent que les travaux de recherche ont été menés en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêt potentiel.

DROITS D'AUTEURS

Copyright © 2023 Ohshima and Blanckensee

Cet article en libre accès est distribué conformément aux conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY). Son utilisation, distribution ou reproduction sont autorisées, à condition que les auteurs d'origine et les détenteurs du droit d'auteur soient crédités et que la publication originale dans cette revue soit citée conformément aux pratiques académiques courantes. Toute utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces conditions est interdite.

JEUNES EXAMINATEURS

CALEB, 10 ANS

Caleb aime tout ce qui touche aux sciences, aux animaux, à la lecture, aux activités de plein air, au violon et au « curling ». Quand il sera grand, Caleb veut devenir architecte et se concentrer sur les bâtiments écologiques et adaptés aux animaux. Il a déjà essayé quatre sports et

est toujours prêt à essayer quelque chose de nouveau. Ses plats préférés sont les macaronis au fromage et les lasagnes. Il aime voyager et aimerait aller dans une réserve d'animaux.

HELENA, 12 ANS

Je m'appelle Helena et je suis en sixième année. J'adore les langues. J'apprends à parler le chinois et l'italien. Mes occupations préférées sont la lecture, l'écriture et l'histoire. Après l'école, je fais de la natation et du violon. Une autre de mes activités favorites est de faire du hamac aérien ou du cerceau aérien. J'ai deux chats et un gecko léopard. J'adore voyager et j'ai visité tellement d'endroits.

YASH, 12 ANS

Je suis un collégien curieux qui s'intéresse aux mathématiques, aux sciences, à la musique, au tennis, à la géographie et à la construction de grands ensembles de LEGO. J'aime faire du bénévolat dans un refuge local pour animaux et j'écris leur bulletin d'information mensuel pour les jeunes. Je joue de la batterie et j'apprends à jouer de nombreux autres instruments de percussion dans l'orchestre de mon école. J'envisage de devenir avocat quand je serai grand, car je commence à bien savoir présenter des arguments justes à mes parents.

BENJAMIN, 10 ANS

Je m'appelle Benjamin et je suis en quatrième année. J'aime les requins et fabriquer des objets en carton. Je suis passionné par les parcs nationaux et j'aime apprendre de nouvelles choses. J'espère voir d'autres articles sur les océans.

AUTEURS

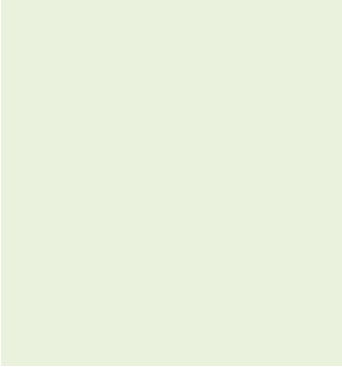
KAY I. OHSHIMA

Kay I. Ohshima a obtenu un doctorat en géophysique à l'Université d'Hokkaido, à Sapporo, au Japon, en 1989. Depuis 2008, il est professeur à l'Institut des sciences des basses températures de l'Université d'Hokkaido. Il a participé à la 32^e expédition japonaise de recherche en Antarctique, qui s'est déroulée de 1990 à 1992. Il a été chercheur invité à l'Ecole d'océanographie de l'Université de Washington, à Seattle, de 2003 à 2004. Ses recherches portent sur le fonctionnement des polynies côtières, la formation de l'EAP et l'observation de la banquise par satellite.

*ohshima@lowtem.hokudai.ac.jp

SIENNA BLANCKENSEE

Sienna Blanckensee est actuellement doctorante à l'Université du Queensland, en Australie (financée par une bourse du Discovery Project du Conseil australien de la recherche - DP220102525). Elle étudie l'océanographie de la région du Cap Darnley en Antarctique de l'Est, en utilisant les données recueillies lors d'une campagne de six



semaines sur le navire de recherche Investigator, de janvier à mars 2023. Elle travaille également sur la modélisation informatique de l'océan afin de déterminer comment se forme l'EAP. Sienna est passionnée par l'océanographie et la météorologie de l'Antarctique, et elle aime partager ses connaissances en enseignant à l'université et avec des élèves âgés de 7 à 18 ans, grâce à son entreprise de tutorat. [*s.blanckensee@uq.net.au](mailto:s.blanckensee@uq.net.au)