

Article publié dans le cadre de l'obtention du Prix Gérard Beltrando 2025 pour une thèse intitulée : 'Contribution de la calotte Antarctique au niveau des mers du 19^{ème} au 21^{ème} siècle et liens avec le forçage anthropique'

Mais qui vide l'Antarctique dans l'océan à la grande cuillère ?

Justine Caillet ^{1,2}, Nicolas Jourdain ¹, Pierre Mathiot ¹, Clara Burgard ^{1,3}

¹ Institut des Géosciences de l'Environnement, Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, INRAE, Grenoble INP, Grenoble, France

² Thayer School of Engineering, Dartmouth College, Hanover, NH, USA

³ LOCEAN, Sorbonne Université, CNRS, IRD, MNHN, Paris, France???

Auteure de correspondance : justine.caillet@univ-grenoble-alpes.fr

Résumé – Pourquoi étudier l'Antarctique ? L'alpiniste George Mallory vous aurait certainement répondu avec flegme *parce qu'il est là !* Alors que le commandant Jean-Baptiste Charcot plutôt *pourquoi pas ?* En réalité, l'Histoire montre que c'est avant tout le goût de l'exploration et la soif de connaissances qui ont nourri notre intérêt pour cette *terra incognita* inhospitalière. Les recherches sur le continent blanc ont connu leur heure de gloire à la fin des années 80 lorsque les glaces millénaires du continent, véritable livre ouvert sur les climats passés, ont permis d'établir le premier lien avéré entre la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et la température moyenne de la planète, révolutionnant alors la climatologie moderne. La découverte récente de la contribution de l'Antarctique au niveau des mers, et son futur très incertain, alimente aujourd'hui une part croissante des recherches. Les satellites révèlent, en effet, que l'Antarctique contribue à l'élévation du niveau des mers depuis plusieurs décennies via la fonte massive induite par l'océan sous les terminaisons flottantes de ses glaciers. Pour autant, les rôles respectifs des influences humaines et naturelles dans cette fonte ne sont pas clairement établis, alors que le succès des politiques d'adaptation pourrait en dépendre. Les travaux présentés ici apportent de nouveaux éléments de réponse sur ces rôles.

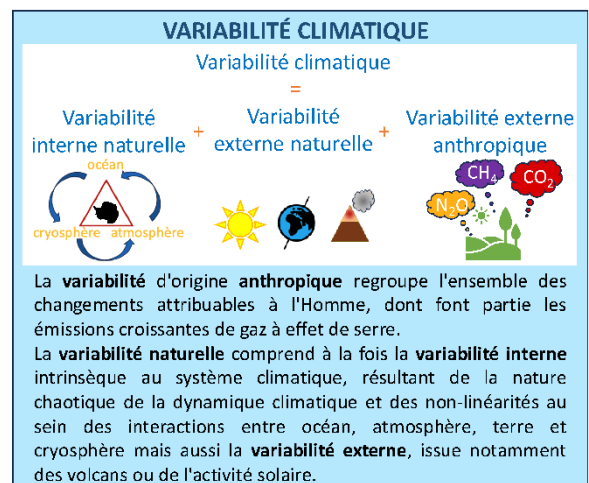
Mots-clés : Calotte Antarctique, détection, forçage anthropique, niveau des mers.

Introduction

« *La connaissance est une navigation dans un océan d'incertitudes à travers des archipels de certitudes.* » (citation d'Edgar Morin). Comble de l'ironie, un de nos archipels, pratiquement certain selon le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), est l'élévation du niveau des mers depuis l'ère préindustrielle. Si, de tout temps, le niveau des mers a fluctué naturellement au gré des millénaires et des cycles glaciaires-interglaciaires en réponse à la variabilité climatique (voir encadré 'Variabilité climatique'), le dernier rapport du GIEC conclut que le principal facteur de l'augmentation du niveau des mers, depuis 1971 au moins, est très probablement anthropique et non naturel (Masson-Delmotte *et al.*, 2021).

D'après ce rapport, les activités humaines sont considérées comme les principales responsables du retrait des glaciers (très probable), du réchauffement

océanique (extrêmement probable) et contribuent à la fonte de la calotte groenlandaise (probabilité moyenne). En revanche, il n'existe qu'un accord moyen mais des preuves encore limitées de l'influence du forçage anthropique sur la contribution de la calotte Antarctique au niveau des mers.



La contribution de l'Antarctique au niveau des mers est estimée via son bilan de masse (figure 1a), c'est-à-dire en faisant la différence entre les quantités de glace gagnées et perdues par la calotte à un instant t. Si la calotte perd de la masse, alors elle contribue positivement au niveau des mers et inversement. Le bilan de masse de la calotte est essentiellement tributaire des échanges avec l'atmosphère en surface (flèche jaune, figure 1a) et de la dynamique glaciaire (flèche violette), c'est-à-dire l'écoulement de la glace sous l'effet de son propre poids, du centre du continent vers ses extrémités, parfois jusqu'à atteindre l'océan où la

glace se met alors à flotter (plateforme de glace). La ligne d'échouage délimite la partie flottante du reste du continent. Bien qu'elles n'interviennent pas directement dans le bilan de masse de la calotte (merci Archimède !), les plateformes de glace influencent la dynamique glaciaire en offrant une résistance à l'écoulement des glaciers en amont. Plus elles sont fines, plus leur rôle de résistance est amoindrie. Elles perdent essentiellement de la masse via la fonte basale induite par l'océan plus chaud (flèche bleue, figure 1a) et via le vèlage d'icebergs au front (flèche verte).

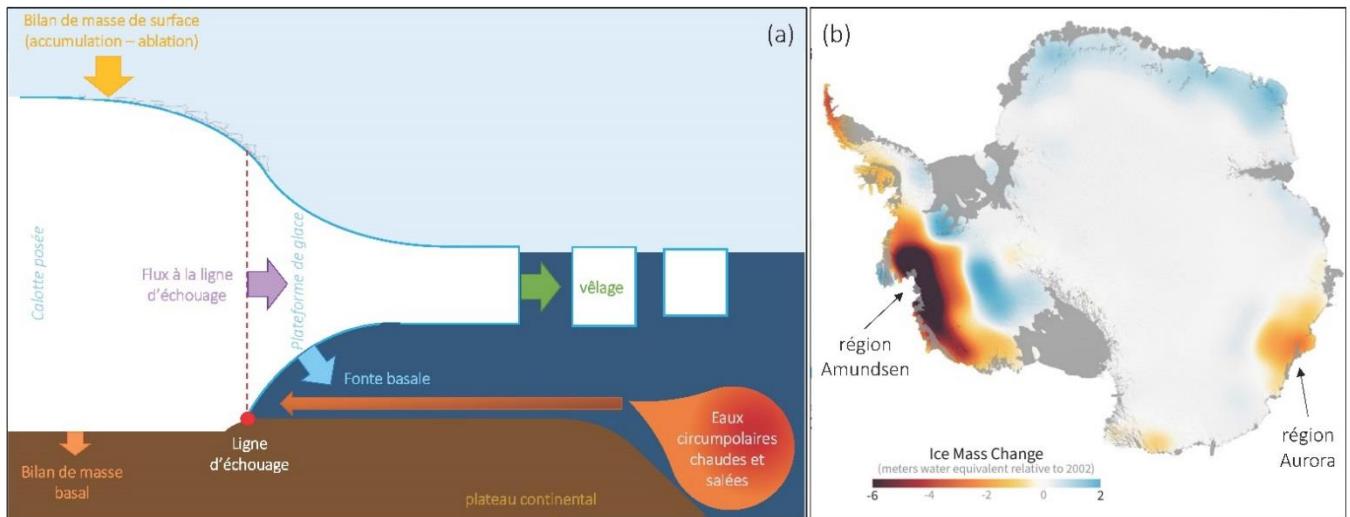


Figure 1. (a) Bilan de masse de la calotte pour le niveau des mers. Le bilan de masse de la calotte est tributaire des échanges avec l'atmosphère (en jaune), de la dynamique glaciaire (flux à la ligne d'échouage, en violet) et des interactions avec le socle rocheux souvent négligées (en orange). Seule la partie posée de la calotte sur le socle rocheux est considérée, la partie flottante (plateforme de glace) étant déjà comptabilisée dans le niveau des mers. Ces plateformes de glace jouent néanmoins un rôle majeur dans la dynamique de la calotte en offrant une résistance à l'écoulement des glaciers en amont. Elles perdent essentiellement de la masse via la fonte basale induite par l'océan plus chaud (en bleu) et via le vèlage d'iceberg (en vert). (b) Perte de masse cumulée observée depuis 2002 (équivalent en mètres d'eau). Les régions d'Amundsen et d'Aurora sont les principaux sièges de perte de masse actuels. La figure est issue du Studio de visualisation scientifique de la NASA.

(a) *Ice-sheet mass balance for sea level. The mass balance depends on exchanges with the atmosphere (in yellow), ice dynamics (grounding line flux, in purple), and interactions with the bedrock, often neglected (in orange). Only the grounded ice sheet is included, as the floating part (ice shelf) is already accounted for in sea levels. However, ice shelves play a major role in the dynamics of the ice sheet by providing resistance to the flow of upstream glaciers. Ice shelves mainly lose mass through basal melting induced by the warmer ocean (in blue) and through iceberg calving (in green).* (b) *Cumulative mass loss observed since 2002 (meter water equivalent). The Amundsen and Aurora regions are experiencing the largest mass losses. The figure is from the Scientific Visualization Studio of NASA.*

D'après les données satellites, l'Antarctique perd de la masse depuis plusieurs décennies, *i.e.* la perte de masse liée à la dynamique glaciaire est supérieure au gain de masse issu des échanges avec l'atmosphère (figure 1a). Les satellites révèlent également que ces changements de masse sont spatialement très hétérogènes. Les secteurs

d'Amundsen et d'Aurora (figure 1b) sont actuellement les principaux sièges de perte de masse. Cette perte marquée résulte principalement de la fonte induite par l'océan sous les plateformes de glace en raison d'un apport d'eaux circumpolaires relativement chaudes sur le plateau continental qui ceinture la calotte (figure 1a).

Si la contribution de la calotte Antarctique au niveau des mers est avérée, l'influence humaine sur cette contribution reste à être explicitement démontrée. Plusieurs éléments peuvent expliquer l'absence de preuves robustes. D'abord, le manque criant d'observations avant le déploiement progressif des satellites. Associé à la méconnaissance de l'impact à court terme de l'océan sur la dynamique glaciaire, ces lacunes ont conduit à une estimation tardive de la contribution au niveau des mers du continent blanc. Avant le 4^{ème} rapport du GIEC en 2007, les estimations étaient basées uniquement sur des corrélations empiriques et des modèles numériques de calotte forcés par l'atmosphère. Ceux-ci prévoyaient une contribution peu importante, voire négative, en raison de la hausse probable des précipitations dans une atmosphère plus chaude. Il faut attendre le 5^{ème} rapport du GIEC en 2013 pour qu'une première quantification réaliste de la contribution dynamique des calottes au niveau des mers soit réalisée (Shepherd et Nowicki, 2017). Ensuite, la présence d'une variabilité interne naturelle marquée, notamment dans le secteur d'Amundsen, où la perte de masse est la plus importante (figure 1b ; England, 2021). Elle se manifeste aussi bien à l'échelle interannuelle, que multi-décennale. Sa présence peut amplifier ou masquer l'effet des forçages anthropique et externe naturelle, rendant difficile la distinction des rôles respectifs des variabilités naturelles et humaines sur la contribution de la calotte au niveau des mers.

Pourtant, un constat semble émerger, la variabilité interne naturelle haute fréquence (annuelle) ne peut pas expliquer, à elle seule, la perte de masse persistante observée depuis les années 40 au moins. La fréquence d'intrusion des eaux chaudes circumpolaires sur le plateau continental de la mer d'Amundsen et le retrait des lignes d'échouage du secteur (Smith *et al.*, 2017) coïncident avec un épisode El Niño majeur au début des années 40. Néanmoins, des travaux suggèrent que cet épisode El Niño n'était probablement pas suffisamment exceptionnel pour expliquer à lui seul, le recul persistant des glaciers dans la mer d'Amundsen jusqu'à aujourd'hui (O'Connor *et al.*, 2023). Sans aucun autre facteur, la calotte glaciaire, stable depuis des millénaires dans cette région (Larter *et al.*, 2014), serait probablement revenue à sa position antérieure dans les années 60, lorsque la

phase de variabilité interne naturelle moyenne fréquence (multi-décennale) s'est inversée.

Parmi les autres facteurs évoqués, une hypothèse dominante est que la perte de masse pourrait avoir été déclenchée par la variabilité interne naturelle dans les années 40 (El Niño), mais que la calotte n'a pas pu se rétablir complètement en raison, à la fois, de l'augmentation des changements climatiques induits par les gaz à effet de serre anthropiques depuis les années 60 et de l'appauvrissement de la couche d'ozone depuis les années 80 (Holland *et al.*, 2022). D'autres travaux, quant à eux, insistent sur le rôle des instabilités dynamiques plutôt que sur l'influence humaine pour expliquer la persistance de perte de masse, notamment entre les années 70 et 90 (Reed *et al.*, 2024). Cette instabilité (dite instabilité de calotte marine) correspond à un recul auto-entretenu de la ligne d'échouage dans les régions où le socle rocheux présente une pente rétrograde. En présence d'une pente rétrograde, l'épaisseur de la glace au droit de la ligne d'échouage en retrait augmente. Or, comme la vitesse d'écoulement de la glace est corrélée à l'épaisseur de glace, l'accélération de l'écoulement provoque un affinement de la plateforme de glace et par conséquent, un recul supplémentaire de la ligne d'échouage, et ce, indépendamment des conditions océaniques environnantes. En outre, l'ensemble de ces travaux n'excluent pas, non plus, les scénarios basés sur l'impact de la variabilité climatique basse fréquence (centennale/millénale), puisque des tendances aux échelles centennales ou supérieures, même modestes, qu'elles soient naturelles ou anthropiques, sont susceptibles d'avoir un effet important sur le recul des lignes d'échouage (Christian *et al.*, 2022).

Face à cette multitude d'hypothèses, l'objectif des travaux présentés ici est d'apporter un nouvel éclairage quant aux rôles des variabilités anthropique et interne sur la perte de masse de la calotte et sa contribution au niveau des mers.

1. Impact potentiel de la variabilité anthropique sur la fonte passée

L'étude des sédiments et des foraminifères (organisme unicellulaire) suggère que plusieurs glaciers de la mer d'Amundsen ont subi un retrait de

leur ligne d'échouage depuis les années 40 en raison de l'intrusion des eaux profondes circumpolaires relativement chaudes sous les plateformes de glace (Hillenbrand *et al.*, 2017 ; Smith *et al.*, 2017). Les campagnes océanographiques et les données satellitaires disponibles depuis les années 90 confirment cette tendance (Jourdain, 2024). Néanmoins, ces données ne permettent pas d'identifier sous quelles conditions climatiques la mer d'Amundsen est susceptible de basculer d'un état froid vers un état chaud, ni si ces conditions sont compatibles avec le réchauffement climatique d'origine humaine depuis l'ère préindustrielle.

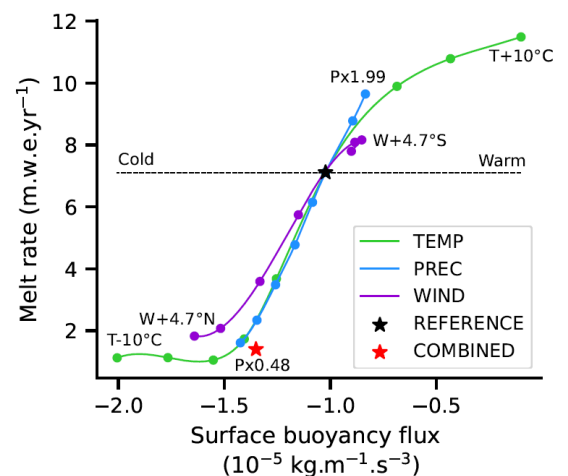
L'identification des conditions climatiques favorables à la transition de la mer d'Amundsen entre des états chauds et froids repose sur un modèle numérique représentant la dynamique et la thermodynamique de l'océan. Une large gamme de conditions atmosphériques a été utilisée pour contraindre le modèle, allant des conditions typiques du dernier âge glaciaire (environ -10°C par rapport au climat actuel) à des conditions plausibles en 2300 sous le scénario d'émission de gaz à effet de serre le plus pessimiste (environ $+10^{\circ}\text{C}$ par rapport au climat actuel). Afin de mieux comprendre les mécanismes en jeu dans ces

transitions, les perturbations atmosphériques sont idéalisées. Les différents flux atmosphériques ont été perturbés indépendamment afin d'isoler les processus physiques à l'œuvre : le flux de chaleur via la température de l'air, le flux d'eau douce via les précipitations et le flux de quantité de mouvement via les vents.

La figure 2 détaille l'effet de telles perturbations atmosphériques sur la fonte des plateformes de glace en mer d'Amundsen. La fonte est exprimée en fonction d'une variable appelée flux de flottabilité en surface, qui traduit l'effet des échanges de chaleur et d'eau douce entre l'atmosphère, l'océan et la banquise sur la densité de l'océan de surface. Une des caractéristiques frappantes de cet ensemble d'expériences est la similitude entre les trois courbes qui représentent chacune un type de perturbations atmosphériques (vent, température de l'air ou précipitations). Cette similitude suggère que les grandes transitions climatiques en mer d'Amundsen résultent principalement des changements de densité à la surface de l'océan. Cette attribution de la variabilité de la fonte aux flux de flottabilité de surface est nouvelle, l'action mécanique du vent sur la circulation océanique étant jusqu'alors l'hypothèse dominante.

Figure 2. Taux de fonte moyen des plateformes de glace en fonction du flux moyen de flottabilité en surface au-dessus du plateau continental de la mer d'Amundsen sur la période 1988-2018. Le flux de flottabilité représente l'effet des échanges de chaleur et d'eau douce entre l'océan, la banquise et l'atmosphère sur la densité de l'océan de surface. Les courbes verte, bleue et violette correspondent respectivement aux perturbations de la température de l'air, des précipitations et des vents. Chaque point représente une perturbation spécifique. L'étoile noire représente le cas de référence (climat actuel). L'étoile rouge correspond au climat actuel abaissé de $0,5^{\circ}\text{C}$ en combinant toutes les perturbations atmosphériques. Figure issue de Caillet *et al.* (2023).

*Mean ice-shelf melt rate as a function of mean surface buoyancy flux over the Amundsen Sea continental shelf for the period 1988–2018. Buoyancy flux reflects the effect of heat and freshwater exchanges between the ocean, sea ice, and atmosphere on surface ocean density. The green, blue, and purple curves correspond to perturbations in air temperature, precipitation, and wind, respectively. Each point represents a specific perturbation. The black star represents the reference case (present-day climate). The red star corresponds to the present-day climate cooled by 0.5°C by combining all atmospheric perturbations. Figure is from Caillet *et al.* (2023).*



Chacune des courbes présente une variation abrupte de fonte bordée par des plateaux asymptotiques, que

ce soit pour des climats froids (partie gauche du graphe) ou des climats chauds (partie droite du

graphe). La présence de ces valeurs asymptotiques indique que les cavités sous les plateformes de glace sont baignées en permanence par (i) des eaux chaudes sous des climats plus chauds, (ii) des eaux froides dans des climats plus froids où l'intrusion des eaux chaudes circumpolaires est relativement limitée, voire inexistante. Sous le climat actuel (étoile noire, figure 2), le taux de fonte sous les plateformes de glace est intermédiaire, témoignant d'une intrusion régulière d'eaux chaudes sous les plateformes de glace. Les simulations montrent que la bascule de la mer d'Amundsen vers un état froid s'opère pour un climat plus froid de 0,5°C par rapport aux conditions actuelles (étoile rouge, figure 2). Des simulations complémentaires suggèrent également que la transition est réversible, *i.e.* l'état du système océanique antérieur à la perturbation se rétablit en quelques décennies après l'annulation de cette dernière, si bien que le sens de la transition, chaud-froid ou froid-chaud, ne module pas les conclusions.

Ainsi la transition d'un état froid vers un état chaud se produit pour des conditions climatiques de 0,5°C inférieures aux conditions actuelles alors que le réchauffement présumé de l'air depuis l'ère préindustrielle est évalué à environ 1°C à l'échelle planétaire (Masson-Delmotte *et al.*, 2021). Ces résultats montrent donc que les conditions préindustrielles pourraient avoir été associées, au moins de manière intermittente, à des conditions froides en mer d'Amundsen et de faibles taux de fonte. La bascule de la mer d'Amundsen dans un état chaud et de forts taux de fonte sous les plateformes de glace est donc potentiellement compatible avec l'influence humaine, notable depuis l'ère industrielle.

2. Impact de la variabilité interne naturelle sur la fonte future

Si les résultats de la partie 1 sont compatibles avec la thèse d'une influence anthropique, ils ne permettent pas pour autant d'écarter la thèse de l'influence de la variabilité interne naturelle. Des variations climatiques de 0,5°C ont déjà été observées avant l'ère préindustrielle et l'influence humaine. Ce second volet s'attache donc à caractériser l'effet de cette variabilité interne naturelle sur la perte de masse future de l'Antarctique.

2.1. Représentation de la variabilité interne dans les modèles climatiques

Les estimations de contribution future de la calotte Antarctique au niveau des mers reposent actuellement sur des modèles numériques représentant l'écoulement de la calotte. Ces modèles sont contraints par des conditions atmosphériques et océaniques issues d'autres modèles numériques : les modèles climatiques globaux incluant océan et atmosphère (modèles CMIP ; Eyring *et al.*, 2016). Pour un modèle climatique donné, l'amplitude de la variabilité interne peut être isolée en considérant plusieurs simulations du même modèle forcées avec le même forçage externe (nommées membres), mais des conditions initiales légèrement différentes. La variabilité interne naturelle simulée par ces modèles climatiques doit être préalablement évaluée afin d'éviter une potentielle sous-estimation de son rôle face aux autres sources de variabilités. L'amplitude de la variabilité interne du climat reste difficile à estimer, mais l'analyse de carottes de glace anciennes suggère que cette variabilité pourrait être sous-estimée dans beaucoup de modèles CMIP (Casado *et al.*, 2023). L'objectif est ici d'identifier les modèles climatiques dont la variabilité interne simulée est extrêmement faible afin de les exclure.

La figure 3 détaille l'écart type multi-membre associé aux variables (i) température de l'air au-dessus du continent Antarctique et (ii) température de l'océan sur le plateau continental qui ceinture l'Antarctique, pour 15 modèles climatiques qui disposent de plus de 10 membres. Cet écart type donne un aperçu de l'amplitude des variabilités internes d'origine atmosphérique et océanique. Si la variabilité interne atmosphérique est relativement élevée pour la grande majorité des modèles (>0,06°C), la variabilité interne océanique est faible (<0,05°C), voir presque inexistante, pour plus de la moitié des modèles alors que les relevés en mer d'Amundsen suggèrent le contraire. L'étude approfondie d'un des modèles montre qu'un faible biais dans la représentation de la banquise et une stratification excessive de l'océan sont à l'origine de cette faible variabilité interne. Les modèles présentant ces biais ne sont donc pas retenus par la suite.

En plus de l'amplitude, le phasage de la variabilité

interne des modèles a également été analysée, car un bon phasage entre un membre et les observations permettrait une évaluation plus robuste et augmenterait la crédibilité d'une projection à partir de ce membre. Cependant, les résultats sont mitigés. La sélection des meilleurs membres est très sensible à la liste des métriques choisies, et aucun membre ne sort clairement du lot. Au vu du nombre de degrés de liberté des modèles climatiques, il est probablement irréaliste d'espérer trouver un

membre parfaitement en phase avec la variabilité observée parmi des ensembles de quelques dizaines de membres, même si les modèles n'étaient pas biaisés. Pour ces raisons, il semble judicieux de prendre en compte plusieurs membres de modèles climatiques dans les projections de contribution de la calotte Antarctique au niveau des mers afin de tenir compte de l'impact lié à la variabilité interne naturelle.

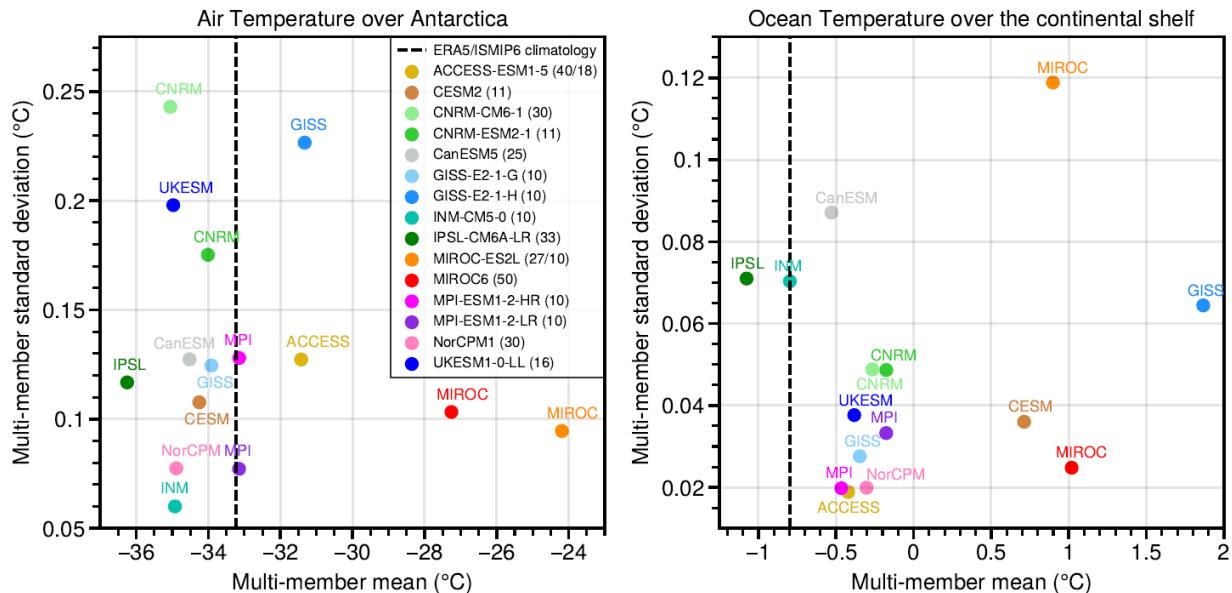


Figure 3. Evaluation de la moyenne et de l'écart type multi-membres sur la période 1995-2014 (a) de la température de l'air à 2 m sur la calotte et (b) de la température de l'océan entre 200 et 700 m de profondeur sur le plateau continental. Le nombre de membres pour chacun des 15 modèles CMIP6 est indiqué entre parenthèses. Lorsque deux chiffres sont indiqués, ils correspondent respectivement aux membres disponibles pour l'atmosphère et l'océan. Les lignes noires en pointillés représentent les moyennes observationnelles, issues de la réanalyse atmosphérique ERA5 et de la climatologie océanique ISMIP6. Figure issue de Caillet *et al.* (2025).

*Assessment of 1995-2014 multi-member mean and standard deviation of (a) the air temperature at 2 m over Antarctica and (b) the ocean temperature between 200 and 700 m depth over the continental shelf. The number of members for each of the 15 CMIP6 is in brackets. When two numbers are indicated, they correspond to the available members for the atmosphere and ocean, respectively. The black dashed lines represent the observational means, from the ERA5 atmospheric reanalysis and from the ISMIP6 observational ocean climatology. Figure is from Caillet *et al.* (2025).*

2.2. Influence de la variabilité interne sur la perte de masse de la calotte

Trois modèles climatiques sont considérés pour contraindre le modèle de calotte glaciaire sur la période 2015-2100, sous le scénario d'émission de gaz à effet de serre médian SSP2-4.5, afin d'évaluer l'impact de la variabilité interne sur les changements de masse de l'Antarctique. Ces modèles ont été choisis pour la fidélité de leur état moyen par rapport aux observations, le choix du modèle climatique représentant une part importante de

l'incertitude sur la contribution au niveau des mers de l'Antarctique (Seroussi *et al.*, 2023). Ces modèles climatiques présentent une variabilité interne atmosphérique élevée et des variabilités internes océaniques très diverses.

Les simulations montrent que la variabilité interne influence la contribution de l'Antarctique au niveau des mers d'ici la fin du siècle de plus de 45 % à 93 % selon le modèle climatique (figure 4a), une influence comparable à l'incertitude liée au choix du modèle climatique. Dans la majorité des

régions antarctiques, les effets de la variabilité interne atmosphérique l'emportent sur ceux de la variabilité interne océanique (facteur de 3,4 en moyenne ; figure 4b-c). Néanmoins, les régions d'Amundsen et d'Aurora, principaux sièges des changements de masse actuels observés, présentent une forte variabilité interne océanique atteignant ou dépassant, selon les modèles climatiques, la variabilité interne atmosphérique qui est pourtant

élevée dans ces régions.

Ces résultats suggèrent que l'influence de la variabilité interne naturelle sur la perte de masse de la calotte ne peut pas être négligée face à la variabilité anthropique, d'autant plus que son impact semble être prédominant dans les régions qui contribuent actuellement le plus au niveau des mers.

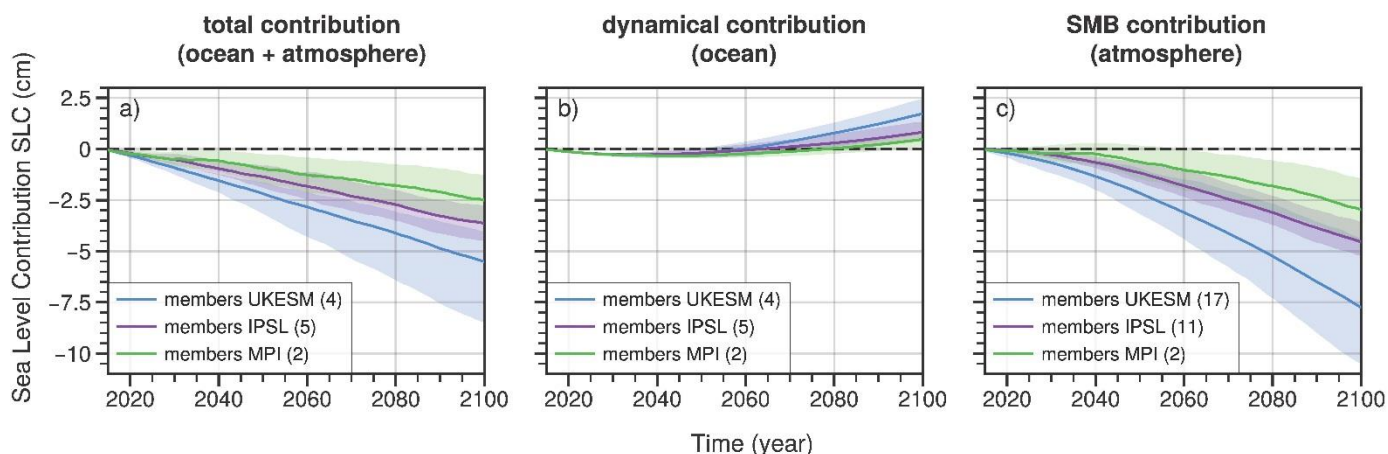


Figure 4. Contribution de l'Antarctique à l'élévation du niveau des mers au cours du XXI^e siècle par rapport à l'année 2015 dans le cadre du scénario SSP2-4.5 pour les modèles climatiques MPI-ESM1.2-HR (vert), IPSL-CM6A-LR (violet) et UKESM1-0-LL (bleu). (a) Contribution totale, (b) contribution dynamique (modulée par la variabilité interne océanique) et (c) contribution du bilan de masse de surface (SMB, modulée par la variabilité interne atmosphérique). Figure issue de Caillet *et al.*, 2025.

*Antarctic Sea Level Contribution over the 21st century relative to year 2015 under the SSP2-4.5 scenario, using the MPI-ESM1.2-HR (green), IPSL-CM6A-LR (purple) and UKESM1-0-LL (blue) climate models. (a) Total contribution, (b) dynamical contribution (modulated by the oceanic internal climate variability) and (c) surface mass balance contribution (SMB, modulated by the atmospheric internal climate variability). Figure is from Caillet *et al.*, 2025.*

3. Vers la détection d'un forçage externe émergeant de la variabilité interne du climat

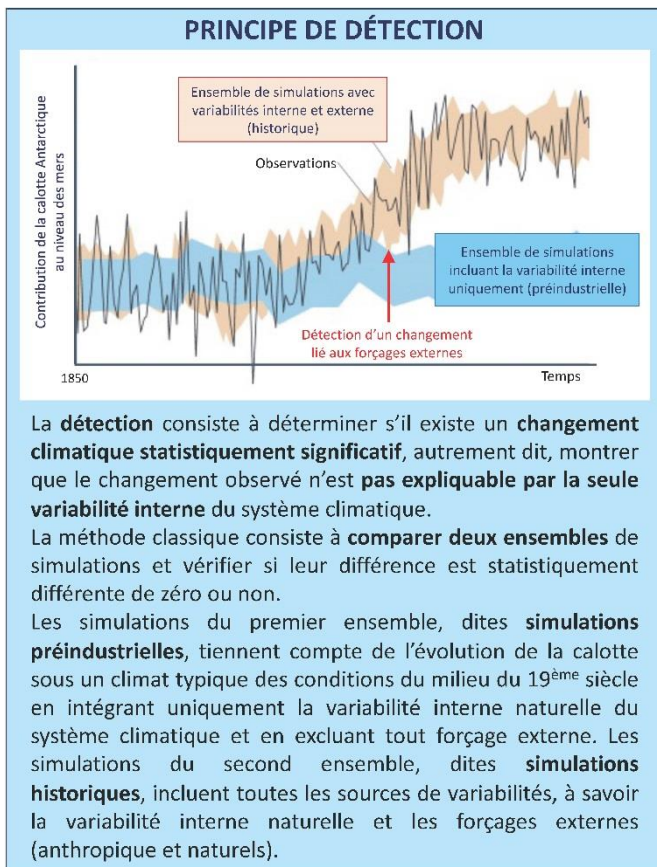
Puisque variabilités naturelle et anthropique sont susceptibles de jouer un rôle dans la perte de masse de la calotte, une étude de détection s'impose afin de vérifier si une source de variabilité externe (anthropique ou naturelle), émerge ou non de la variabilité interne naturelle du climat.

Les travaux s'appuient sur la méthode de détection classique (voir encadré 'Principe de détection' ci-après), qui vise à comparer deux ensembles de simulations aux scénarios distincts, un tenant compte de l'ensemble des forçages climatiques observés ("historique"), l'autre non forcé tenant compte uniquement de la variabilité

interne ("préindustriel").

Cette détection nécessite (i) un forçage climatique qui soit cohérent avec les observations et (ii) un modèle de calotte glaciaire initialisé en 1850 (avant l'influence anthropique) qui reproduise les pertes de masse observées.

D'après les analyses décrites dans la partie 2.1, le modèle climatique IPSL-CM6A-LR est retenu car il dispose de plusieurs membres, d'une atmosphère et d'un océan dont l'état moyen actuel est proche des observations et dont la variabilité interne naturelle est marquée. L'initialisation du modèle de calotte est relativement complexe en raison de l'absence d'observations au préindustriel et fait donc l'objet d'une étude à part entière.



3.1. Construction d'un état initial en 1850

Un état initial plausible de la calotte en 1850 est d'importance névralgique car les projections centennales de changement de masse de la calotte en dépendent fortement. En général, l'état initial des modèles de calotte est estimé à l'aide d'une méthode d'inversion ou d'une méthode de spin-up. Les méthodes d'inversion s'appuient sur une géométrie et des vitesses réalistes, mais ne peuvent pas être utilisées avant les années 90, en raison du manque d'observations. Les méthodes de spin-up, qui assurent un équilibre entre la calotte et les forçages climatiques, permettent d'initialiser les modèles avant le préindustriel mais conduisent très souvent à des géométries actuelles peu réalistes.

Une méthode hybride susceptible de combiner les avantages des deux méthodes d'initialisation est envisagée pour une reconstruction d'états initiaux plausibles en 1850. Le nouvel état initial repose sur un modèle de calotte basé sur une méthode d'inversion. La calotte dans son état actuel subit une recroissance jusqu'en 1850 sous des conditions climatiques favorables. La calotte est soumise à (i) un forçage océanique uniforme, en supposant des

eaux froides sur le pourtour antarctique et (ii) le forçage atmosphérique historique mais appliqué en chronologie inverse et avec une anomalie inversée afin de permettre une conservation du bilan de masse de surface suite à la succession des phases de recroissance et historique. D'un côté, l'étude détaillée en partie 1 suggère que le pourtour antarctique est baigné, au moins de manière intermittente, par des eaux froides au préindustriel et que les transitions dans l'océan sont réversibles, ce qui devrait favoriser la plausibilité des états initiaux construits. D'un autre côté, le comportement non linéaire de la calotte et le manque criant d'observations ne présentent pas du succès de cette méthode.

La comparaison aux observations des résultats de simulations fondées sur ce nouvel état initial montre que l'état actuel simulé de la calotte est relativement proche des observations, mais qu'il existe néanmoins de grandes disparités régionales. L'évolution globale de la partie Est de l'Antarctique est relativement limitée au cours de la période historique, ce qui peut expliquer que l'ensemble des états actuels simulés soient relativement proches des observations. Les résultats sont plus contrastés en Antarctique de l'Ouest avec une évolution raisonnable excepté dans le secteur d'Amundsen. L'épaisseur simulée en Amundsen en 1850 est proche de l'épaisseur actuelle, alors que les observations satellitaires montrent une perte d'épaisseur importante ces dernières décennies, et la ligne d'échouage n'a pas suffisamment re-avancé pour atteindre sa position présumée de 1940. Des études complémentaires doivent être réalisées afin d'investiguer (i) si un effet d'hystéresis existe, nécessitant un temps de recroissance plus long, et éventuellement des conditions climatiques plus froides que celles en vigueur pendant l'historique pour reconstruire des états initiaux plausibles dans ce secteur ; (ii) si la dynamique de la glace est suffisamment bien représentée dans le modèle. Enfin, la dynamique de la Péninsule antarctique n'est pas correctement représentée en raison de la complexité de la région (zone montagneuse escarpée en partie non englacée) et n'est donc pas considérée dans les analyses. Autrement dit, la détection d'un signal dû au forçage externe est réalisée uniquement en Antarctique de l'Est et de l'Ouest.

3.2. Détection du forçage externe

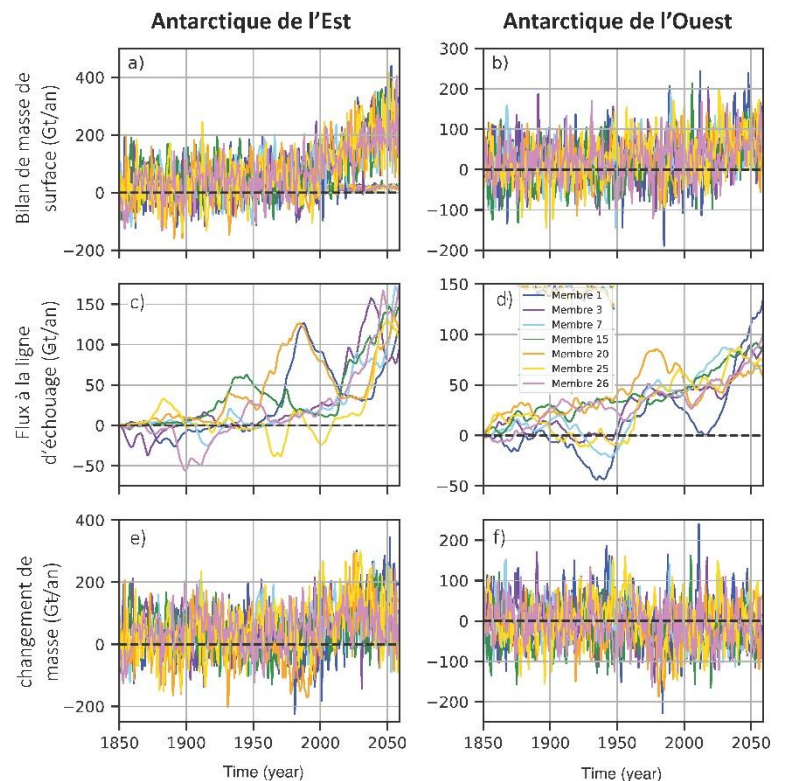
Deux ensembles de simulations (7 membres chacun) avec des scénarios distincts sont comparés, l'un tenant compte de l'ensemble des forçages climatiques observés (historique), l'autre tenant compte uniquement de la variabilité interne (préindustriel). Pour évaluer l'émergence du signal attribuable au forçage externe (anthropique et naturel), un test statistique de Student est utilisé afin de tester l'hypothèse selon laquelle la moyenne des différences entre les simulations historiques et préindustrielles n'est pas égale à zéro. L'émergence est considérée pour un niveau de confiance de 95 %.

L'influence du forçage externe sur la contribution au niveau des mers est détectée à partir de 2001 en Antarctique de l'Est (figure 5e). L'analyse des

composantes du bilan de masse de la calotte suggère que cette détection résulte de l'émergence d'un signal atmosphérique dû au forçage externe dès les années 1950 (figure 5a), qui domine le signal dynamique (figure 5b), qui n'émerge que de manière intermittente depuis la fin des années 70. En Antarctique de l'Ouest, le test de Student indique que l'influence des forçages externes sur la contribution au niveau des mers ne peut pas être détectée de façon robuste (figure 5f). Néanmoins, des signaux atmosphériques et dynamiques dus au forçage externe émergent (figure 5b-d), de manière intermittente, dès les années 50. Ces deux signaux, de signe opposé et d'amplitude similaire, se compensent et expliquent l'absence de détection du signal lié au forçage externe sur la perte de masse de la calotte dans ce secteur.

Figure 5. Différence entre les simulations historiques et préindustrielles pour les principales composantes du bilan de masse de la calotte sur la période 1850-2059. Les résultats sont affichés pour chaque membre de l'ensemble et pour les deux principales régions : l'Antarctique de l'Est (à gauche) et l'Antarctique de l'Ouest (à droite). Les lignes 1 à 3 détaillent le bilan de masse en surface, le flux à la ligne d'échouage (dynamique de la calotte) et le taux de changement de masse de la calotte posée dont est déduite la contribution au niveau des mers. Figure issue de Caillet (2024).

Difference between historical and pre-industrial simulations for the main components of the ice sheet mass balance over the period 1850-2059. The results are given in gigatons per year for each member of the ensemble and for the two main regions: East Antarctica (left) and West Antarctica (right). Lines 1 to 3 detail the surface mass balance, the grounding line flux (ice-sheet dynamics), and the mass change rate, used to estimate the contribution to sea level rise. Figure is from Caillet (2024).



Ces premiers résultats sont prometteurs bien que des améliorations de l'état initial et des études de sensibilité soient nécessaires pour une plus grande robustesse. Ces résultats sont néanmoins cohérents avec les études d'attribution sur (i) des paramètres atmosphériques qui suggèrent une influence anthropique sur l'ensemble du continent dès les années 50 et sur (ii) des paramètres océaniques en Amundsen dès les années 60 (Holland *et al.*, 2022 ; Dalaiden *et al.*, 2024).

Cette étude montre qu'il existe un changement climatique lié au forçage externe, car non explicable par la seule variabilité interne naturelle, mais ne peut déterminer quel est le forçage externe incriminé. Des études d'attribution utilisant des simulations historiques basées sur les forçages externes individualisés pourraient permettre d'établir une distinction claire entre le forçage externe naturel (activité solaire et volcans) et le forçage anthropique. Affaire à suivre...

Conclusion

Les approches multiples, via modélisation océanique et modélisation des calottes polaires, ont permis d'apporter de nouveaux éléments de compréhension quant aux interactions océan-calotte et de la nécessité de mieux les prendre en compte, notamment en les intégrant aux modèles climatiques.

Ces travaux ont également démontré que ni l'influence de la variabilité interne et ni celle des forçages externes ne peuvent être négligées dans les changements de masse passés ou futurs de la calotte. L'étude de détection suggère que la contribution de la calotte au niveau des mers est influencée par les forçages externes (anthropique et/ou naturelle) dès les années 2000 en Antarctique de l'Est, en raison d'une émergence prédominante du signal atmosphérique. L'influence des forçages externes n'est pas détectée en Antarctique de l'Ouest, en raison de la compensation entre signaux atmosphérique et océanique qui émergent pourtant tous les deux de la variabilité interne, au moins de manière intermittente, dès les années 1950.

Mais pour connaître qui, de la variabilité naturelle externe ou de la variabilité anthropique, aide grandement la variabilité interne à vider l'Antarctique à grande cuillère dans l'océan... de l'eau doit encore couler sous les ponts.

Remerciements : Je remercie le jury du prix Gérard Beltrando et l'Association Internationale de Climatologie (AIC) pour l'intérêt porté à mes travaux de thèse. Je remercie également chaleureusement toutes les personnes avec qui j'ai eu le plaisir de collaborer et qui ont rendu possible la réalisation de ces travaux, notamment Nicolas Jourdain pour son encadrement d'une grande qualité. Enfin, je remercie l'Université Grenoble Alpes et l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour le financement de ces travaux au travers des projets EIS (ANR-19-CE01-0015) et ISCLIM (France 2030, PEPR TRACCS, ANR-22-EXTR-0010).

Références

Caillet J., Jourdain N. C., Mathiot P., Hellmer H. H., Mouginit J., 2023. Drivers and reversibility of abrupt ocean state transitions in the Amundsen Sea, Antarctica. *Journal of*

Geophysical Research: Oceans, 128, 1, e2022JC018929.

Caillet J., 2024. Contribution de la calotte Antarctique au niveau des mers du 19^{ème} au 21^{ème} siècle et liens avec le forçage anthropique. PhD thesis, Université Grenoble Alpes.

Caillet J., Jourdain N. C., Mathiot P., Gillet-Chaulet F., Urruty B., Burgard C., Amory C., Chekki M., Kittel C., 2025. Uncertainty in the projected Antarctic contribution to sea level due to internal climate variability. *Earth System Dynamics*, 16, 1, 293-315.

Casado M., Hébert R., Faranda D., Landais A., 2023. The quandary of detecting the signature of climate change in Antarctica. *Nature Climate Change*, 13, 10, 1082-1088.

Christian J. E., Robel A. A., Catania G., 2022. A probabilistic framework for quantifying the role of anthropogenic climate change in marine-terminating glacier retreats. *The Cryosphere*, 16, 7, 2725-2743.

Dalaiden Q., Abram N., Goosse H., 2024. Tropical Pacific variability and anthropogenic forcing are the key drivers of the West Antarctic atmospheric circulation variability over the 20th century. Technical report, Copernicus Meetings, 2023.

England M. R., 2021. Are multi-decadal fluctuations in Arctic and Antarctic surface temperatures a forced response to anthropogenic emissions or part of internal climate variability? *Geophysical Research Letters*, 48(6):e2020GL090631.

Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A., Stevens B., Stouffer R. J., Taylor K. E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 5, 1937-1958.

Hillenbrand C.-D., Smith J. A., Hodell D. A., Greaves M., Poole C. R., Kender S., Williams M., Andersen T. J., Jernas P. E., Elderfield H. *et al.*, 2017. West Antarctic ice sheet retreat driven by Holocene warm water incursions. *Nature*, 547, 7661, 43-48.

Holland P. R., O'Connor G. K., Bracegirdle T. J., Dutrieux P., Naughten K. A., Steig E. J., Schneider D. P., Jenkins A., Smith J. A., 2022. Anthropogenic and internal drivers of wind changes over the Amundsen Sea, West Antarctica, during the 20th and 21st centuries. *The Cryosphere*, 16, 12, 5085-5105.

Jourdain N. C., 2024. Les plateformes de glace d'Antarctique : De leur découverte à leur désintégration. *La Météorologie*, 127, 50-56.

Larter R. D., Anderson J. B., Graham A. G. C., Gohl K., Hillenbrand C. D., Jakobsson M., Johnson J. S., Kuhn G., Nitsche F. O., Smith J. A., Witus A. E., Bentley M. J., Dowdeswell J. A., Ehrmann W., Klages J. P., Lindow J., Cofaigh C. O., Spiegel C., 2014. Reconstruction of changes in the Amundsen Sea and Bellingshausen Sea sector of the West Antarctic ice sheet since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 100, 55-86.

Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S. L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M. I. *et al.*, 2021. Climate change 2021: the physical science basis.

Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2, 13.

O'Connor G. K., Holland P. R., Steig E. J., Dutrieux P., Hakim G. J., 2023. Characteristics and rarity of the strong 1940s westerly wind event over the Amundsen Sea, West Antarctica. *The Cryosphere*, 17(10), 4399-4420.

Reed B., Mattias Green J. A., Jenkins A., Hilmar Gudmundsson G., 2024. Recent irreversible retreat phase of Pine Island glacier. *Nature Climate Change*, 14, 1, 75-81.

Seroussi H., Verjans V., Nowicki S., Payne A. J., Goelzer H.,

Lipscomb W. H., Ouchi A. A., Agosta C., Albrecht T., Asay-Davis X. *et al.*, 2023. Insights on the vulnerability of Antarctic glaciers from the ISMIP6 ice sheet model ensemble and associated uncertainty. *The Cryosphere*, 17, 5197-5217.

Shepherd A. et Nowicki S., 2017. Improvements in ice-sheet sea-level projections. *Nature Climate Change*, 7(10), 672-674.

Smith J. A., Andersen T. J., Shortt M., Gaffney A. M., Truffer M., Stanton T. P., Bindshadler R., Dutrieux P., Jenkins A., Hillenbrand CX.-D. *et al.*, 2017. Sub-ice-shelf sediments record history of twentieth-century retreat of pine island glacier. *Nature*, 541, 7635, 77-80.

Citation de l'article : Caillet J., Jourdain N., Mathiot P., Burgard C., 2025. Mais qui vide l'Antarctique dans l'océan à la grande cuillère ? *Climatologie*, 23, 1.