

# UNDERSTANDING AND PREDICTING ANTARCTIC SEA ICE VARIABILITY AT THE DECADAL TIMESCALE “PREDANTAR”

Hugues Goosse, Sally Close, Svetlana Dubinkina, François Massonnet and Violette Zunz (UCL)  
Stéphane Vannitsem and Bert Van Schaeybroeck (IRMB)  
Alexander Barth and Martin Canter (ULg)

## Résumé du rapport scientifique final - Juin 2015

Au cours des dernières décennies, la glace de mer a évolué de façon très différente dans les deux régions polaires de la Terre (Turner and Overland, 2009). Alors que la couverture de glace de mer en Arctique s’est fortement réduite, l’étendue de glace de mer entourant l’Antarctique a augmenté à un rythme estimé entre 0.13 et 0.2 million de km<sup>2</sup> entre novembre 1978 et décembre 2012 (Vaughan et al., 2013). L’étude récente de Eisenman et al. (2014) suggère que l’ampleur de cette tendance positive pourrait avoir été surestimée en raison d’une modification de l’algorithme utilisé pour traiter les données satellitaires. Néanmoins, l’estimation la plus basse de la tendance de l’étendue de glace de mer antarctique indique encore une légère augmentation qui est assez déconcertante dans un contexte de réchauffement global.

L’évolution de la glace de mer antarctique est régie par une combinaison de différents mécanismes impliquant à la fois le forçage externe et la variabilité interne du système. Par exemple, la diminution de la concentration de l’ozone stratosphérique (Solomon, 1999) a été désigné comme cause potentielle de l’augmentation de l’étendue de glace de mer. Toutefois, cette hypothèse n’est pas compatible avec plusieurs analyses récentes basées sur des résultats de modèles climatiques (ex. : Bitz and Polvani, 2012; Sigmond and Fyfe, 2010, 2013; Smith et al., 2012). Cependant, la réponse de la glace de mer antarctique à cette diminution de la concentration de l’ozone stratosphérique pourrait impliquer des mécanismes complexes qui nécessitent des études complémentaires (Ferreira et al., 2015).

L’évolution de la couverture de glace de mer observée pourrait être associée à des changements au niveau de la circulation atmosphérique ou de la stratification de l’océan (ex.: Bitz et al., 2006; Goosse and Zunz, 2014; Goosse et al., 2009; Holland and Kwok, 2012; Kirkman and Bitz, 2010; Landrum et al., 2012; de Lavergne et al., 2014; Lefebvre and Goosse, 2008; Stammerjohn et al., 2008; Zhang, 2007). Par exemple, la fonte de la calotte de glace antarctique (ex. : Pritchard et al., 2012; Rignot et al., 2008; Shepherd et al., 2012; Velicogna, 2009) et l’augmentation des précipitations aux hautes latitudes australes résultant de l’amplification du cycle hydrologique (ex. : Liu and Curry, 2010) induit par le réchauffement global pourraient aboutir à un adoucissement de la surface de l’océan Austral. Cet adoucissement entraîne un renforcement de la stratification verticale de l’océan qui, à son tour, réduit les échanges de chaleur entre la couche intermédiaire, relativement chaude, et la couche de surface, plus froide, de l’océan. Cette réduction du flux de chaleur vertical dans l’océan favorise la formation de glace de mer à la surface et peut donc expliquer l’accroissement de la couverture de glace de mer antarctique.

Ces changements de circulation atmosphérique et océanique ainsi que de la couverture de glace de mer antarctique ont été attribués (au moins partiellement) à la variabilité multi-décennale générée par des processus internes au système (ex. : Gagné et al., 2015; Mahlstein et al., 2013; Polvani and Smith, 2013; Swart and Fyfe, 2012; Zunz et al., 2013). En particulier, l’augmentation d’étendue de glace de mer observée depuis 1979 pourrait avoir été précédée par une forte diminution de l’étendue de glace au cours des années 1960 (ex. : Cavalieri et al., 2003; Cotté and Guinet, 2007; Curran et al.,

2003; Gagné et al., 2015; de la Mare, 1997, 2009). Cette hypothèse est étayée par les quelques observations disponibles avant 1979. Néanmoins, la période de temps pour laquelle des observations fiables de la glace de mer antarctique sont disponibles est trop courte pour examiner précisément les changements de glace de mer générés par des processus internes. Dans ce contexte, les résultats de simulations réalisées avec des modèles climatiques constituent un ensemble de données complet qui peut compenser le manque d'observations. Malheureusement, les modèles climatiques présentent souvent des biais importants dans l'océan Austral à la fois pour l'état moyen et pour la variabilité du système (Arzel et al., 2006; Bracegirdle et al., 2008; Mahlstein et al., 2013; Zunz et al., 2013).

Les activités de recherche entreprises dans le cadre du projet PREDANTAR ont pour objectif, premièrement, de combiner au mieux ces modèles imparfaits et les observations incomplètes afin d'améliorer notre compréhension des mécanismes complexes qui régissent les changements de la glace de mer antarctique et de réaliser de meilleures prévisions. Des modèles climatiques couplés sont ici utilisés pour identifier les processus impliqués dans les changements observés dans l'océan Austral. Au travers du présent projet, des outils de post-traitement permettant d'évaluer les erreurs des modèles et d'estimer les corrections à appliquer ont été développés et appliqués à la fois à des modèles climatiques simples et plus complexes. De plus, des techniques d'assimilation de données ont été mises en place afin d'obtenir des reconstructions optimales de la couverture de glace de mer antarctique. Ces reconstructions constituent des estimations précieuses des changements de l'état de la couverture de glace dans l'océan Austral au cours des 30 dernières années qui compensent le manque d'observations même sur cette période récente. Grâce à cette meilleure compréhension des mécanismes responsable des changements de la couverture de glace antarctique, une méthodologie a été développée afin d'améliorer les prévisions et les projections des changements dans cette région. En particulier, l'impact de l'initialisation à partir d'un état obtenu grâce à différentes techniques d'assimilation sur les simulations fournissant les prévisions a été évalué. Cette analyse montre comment une qualité satisfaisante pour les prévisions des tendances d'étendue de glace de mer peut être obtenue.

La calibration et le post-traitement ont pour objectif d'améliorer les prévisions une fois qu'elles ont été produites par le modèle. Le but est de diminuer l'impact des erreurs du modèle sur les prévisions et/ou l'évaluation de l'incertitude associée à ces prévisions. Ces améliorations sont fortement liées aux concepts de finesse (*resolution* en anglais) et de fiabilité (*reliability* en anglais), pour lesquels les prévisions doivent être aussi proche que possible de l'état vrai (finesse élevée) et, en même temps, l'estimation de leur incertitude doit être une bonne mesure de l'erreur (fiabilité élevée). Dans le cadre de ce projet, les techniques de calibration ont été développées à la fois pour des prévisions déterministes et d'ensemble. Ces corrections se sont montrées efficaces pour autant qu'elles soient appliquées à des prévisions de qualité et pour de courtes échéances. De plus, le post-traitement basé sur une régression linéaire nous permet d'évaluer l'ampleur des erreurs du modèle et leur origine potentielle dans des prévisions à court terme réalisée avec le modèle couplé océan-glace de mer NEMO-LIM utilisé pour construire une réanalyse de l'océan Austral.

Ces techniques ont également été utilisées dans le but de corriger des prévisions à long terme dans des conditions de forçage externe statique ou transitoire, à la fois avec des modèles climatiques idéalisés d'ordre réduit et avec un modèle climatique de complexité intermédiaire (LOVECLIM). Il s'avère que la dynamique transitoire du forçage externe influence considérablement la possibilité d'utiliser le post-traitement (la correction des biais ou des techniques plus sophistiquées) dans des conditions de changements climatiques importants. Il faut donc être prudent en utilisant cette approche qui doit être évaluée méticuleusement pour chaque cas. De plus, une technique de correction des biais simple s'est avérée fournir la plus importante correction des erreurs du modèle pour les prévisions à long terme (aux échelles annuelle, inter-annuelle et décennale) alors que des techniques plus sophistiquées, locales et non-locales, ne fournissent que des corrections marginales.

Afin de contribuer à une meilleure compréhension de la variabilité dans l'océan Austral, une réanalyse assimilant la température de surface de l'océan, la concentration de glace de mer et la dérive de la glace de mer a été réalisée. Étant donné que la dérive de la glace de mer est fortement reliée aux vents, une procédure spécifique a été adoptée pour la dérive de la glace. La corrélation entre le vent de surface en moyenne sur 3 jours et la dérive de glace est élevée et cette relation a été utilisée pour ajuster le vent en utilisant des pseudo-observations du vent basées sur des données de dérive de glace de mer. Les corrections apportées au vent ont été validées indépendamment pour montrer l'efficacité de cette approche.

A partir de ce vent ajusté, une réanalyse constituée d'un ensemble de 50 membres a été réalisée avec le modèle couplé océan-glace de mer NEMO-LIM2 pour la période de 1985 à 2006. La réanalyse a été validée en utilisant la base de données World Ocean Database. Puisque la réanalyse est focalisée sur l'océan Austral, l'impact de l'assimilation sur le courant circumpolaire antarctique a également été évalué en comparant l'élévation moyenne de la surface de l'océan à la topographie dynamique moyenne dérivée de diverses observations. L'assimilation améliore la position et l'amplitude du courant circumpolaire antarctique.

Pour de tels modèles à basse résolution, une grande partie des erreurs est due à des biais. Une approche permettant d'explorer la possibilité de réduire les biais des modèles grâce à l'estimation de paramètres a été mise en place. Le principe général pour aborder ce problème consiste à ajouter un forçage stochastique (dans un premier temps constant dans le temps) aux équations dynamiques et d'estimer ce forçage en utilisant l'assimilation de données. Des tests simples avec le modèle Lorenz 96 ont confirmé le bien-fondé de cette approche. Les résultats de cette approche appliquée au modèle NEMO-LIM2 sont également encourageants et ouvrent la voie vers une technique permettant de réduire les biais dans des modèles climatiques à basse résolution.

L'analyse des résultats des modèles fournis dans le cadre de la phase 5 du projet d'inter-comparaison de modèles couplés (5<sup>th</sup> Coupled Model Intercomparison Project, CMIP5) ont aussi mis en évidence des biais systématiques de l'état moyen et de la variabilité interne dans les simulations de la glace de mer antarctique. Néanmoins, une tendance positive de l'étendue de glace au cours des 30 dernières années, bien qu'étant rare parmi les simulations historiques du projet CMIP5, est compatible avec la variabilité interne simulée par les modèles CMIP5. Dans ces modèles, la chaleur fournie à la fois par l'océan en-dessous et l'atmosphère au-dessus de la glace de mer influence nettement la couverture de glace de mer. L'influence relative de ces deux mécanismes sur l'état de la glace de mer est fortement dépendante du modèle. Des recherches complémentaires fondées sur les résultats d'un modèle de complexité intermédiaire ont permis d'identifier un processus relié aux interactions océan-glace de mer qui pourrait expliquer de nombreuses caractéristiques des changements récents de la couverture de glace de mer antarctique observés. Ce mécanisme consiste en une stabilisation de la colonne d'eau en raison de changements dans le cycle saisonnier de la formation de glace.

La capacité d'un modèle climatique de complexité intermédiaire à prévoir la couverture de glace antarctique a d'abord été évaluée dans des conditions idéalisées qui permettent de ne pas avoir à tenir compte des biais des modèles. Dans cette étude idéalisée, quasiment aucune prévisibilité n'a été obtenue pour la glace de mer antarctique à des échelles de temps interannuelles, probablement à cause de processus atmosphériques imprévisibles qui dominent le signal à ces échelles de temps. Par ailleurs, une prévisibilité assez élevée a été mise en évidence pour la tendance de l'étendue de glace de mer sur des échelles de temps multi-décennales. Une initialisation adéquate de l'océan en-dessous de la glace, obtenue grâce à une procédure d'assimilation de données, a été identifiée comme un élément-clé pour assurer une qualité satisfaisante des prévisions des tendances d'étendue de glace. Dans des conditions réalistes, nos résultats indiquent que l'initialisation du système par l'intermédiaire de l'assimilation de données peut également améliorer les tendances d'étendue de glace et de concentration simulées sur la période 1980–2009.

La glace de mer antarctique, tout en étant une couche de glace relativement petite et fine recouvrant l'océan Austral, agit fortement sur l'écosystème de l'Antarctique et sur l'évolution du climat à l'échelle locale et globale. En particulier, la glace de mer antarctique influence les échanges de chaleur dans l'océan, l'absorption du carbone par les océans et l'augmentation du niveau des mers au travers des interactions avec la calotte de glace antarctique. Dès lors, comprendre le comportement de la glace de mer antarctique et prévoir son évolution constitue un enjeu de taille dans un contexte de développement durable. Les causes de l'augmentation récente de l'étendue de glace de mer antarctique n'ont pas encore été fermement identifiées à ce stade. Néanmoins, les connaissances relatives aux mécanismes qui gouvernent la variabilité de la glace de mer antarctique ont été nettement enrichies grâce aux travaux menés dans le cadre du projet PREDANTAR. Ce projet a également permis de tester différentes techniques, fondées sur des outils de post-traitement et des procédures d'assimilation de données, visant à améliorer les reconstructions et les prévisions de la couverture de glace de mer antarctique. Ces travaux contribueront fortement à l'amélioration des prévisions et des projections non seulement pour l'océan Austral mais aussi à l'échelle globale. De plus, même si ce travail portait essentiellement sur la glace de mer dans l'océan Austral, les techniques de post-traitement et d'assimilation de données mise en place dans le cadre de PREDANTAR peuvent être utilisées pour améliorer la prévisibilité aux échelles décennales dans d'autres régions et pour d'autres variables climatiques.

## Bibliographie

Arzel, O., Fichefet, T. and Goosse, H.: Sea ice evolution over the 20th and 21st centuries as simulated by current AOGCMs, *Ocean Model.*, 12(3--4), 401–415, 2006.

Bitz, C. M. and Polvani, L. M.: Antarctic climate response to stratospheric ozone depletion in a fine resolution ocean climate model, *Geophys. Res. Lett.*, 39(20), doi:10.1029/2012GL053393, 2012.

Bitz, C. M., Gent, P. R., Woodgate, R. A., Holland, M. M. and Lindsay, R.: The Influence of Sea Ice on Ocean Heat Uptake in Response to Increasing {CO<sub>2</sub>}, *J. Clim.*, 19(11), 2437–2450, 2006.

Bracegirdle, T. J., Connolley, W. M. and Turner, J.: Antarctic climate change over the twenty first century, *J. Geophys. Res.*, 113(D3), doi:10.1029/2007JD008933, 2008.

Cavalieri, D. J., Parkinson, C. L. and Vinnikov, K. Y.: 30-Year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability, *Geophys. Res. Lett.*, 30(18), doi:10.1029/2003GL018031, 2003.

Cotté, C. and Guinet, C.: Historical whaling records reveal major regional retreat of Antarctic sea ice, *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.*, 54(2), 243–252, doi:10.1016/j.dsr.2006.11.001, 2007.

Curran, M. A. J., van Ommen, T. D., Morgan, V. I., Phillips, K. L. and Palmer, A. S.: Ice Core Evidence for {Antarctic} Sea Ice Decline Since the 1950s, *Science (80- )*, 302(5648), 1203–1206, doi:10.1126/science.1087888, 2003.

Eisenman, I., Meier, W. N. and Norris, J. R.: A spurious jump in the satellite record: has Antarctic sea ice expansion been overestimated?, *Cryosph.*, 8(4), 1289–1296, doi:10.5194/tc-8-1289-2014, 2014.

Ferreira, D., Marshall, J., Bitz, C. M., Solomon, S. and Plumb, A.: Antarctic Ocean and Sea Ice Response to Ozone Depletion: A Two-Time-Scale Problem, *J. Clim.*, 28(3), 1206–1226, 2015.

- Gagné, M.-È., Gillett, N. P. and Fyfe, J. C.: Observed and simulated changes in Antarctic sea ice extent over the past 50 years, *Geophys. Res. Lett.*, 42(1), 2014GL062231, 2015.
- Goosse, H. and Zunz, V.: Decadal trends in the Antarctic sea ice extent ultimately controlled by ice-ocean feedback, *Cryosph.*, 8(2), 453–470, doi:10.5194/tc-8-453-2014, 2014.
- Goosse, H., Lefebvre, W., de Montety, A., Crespin, E. and Orsi, A.: Consistent past half-century trends in the atmosphere, the sea ice and the ocean at high southern latitudes, *Clim. Dyn.*, 33(7), 999–1016, 2009.
- Holland, P. R. and Kwok, R.: Wind-driven trends in Antarctic sea-ice drift, *Nat. Geosci.*, 5(12), 872–875, 2012.
- Kirkman, C. H. and Bitz, C. M.: The Effect of the Sea Ice Freshwater Flux on Southern Ocean Temperatures in CCSM3: Deep-Ocean Warming and Delayed Surface Warming, *J. Clim.*, 24(9), 2224–2237, 2010.
- De la Mare, W. K.: Abrupt mid-twentieth-century decline in Antarctic sea-ice extent from whaling records, *Nature*, 389(6646), 57–60, 1997.
- De la Mare, W. K.: Changes in Antarctic sea-ice extent from direct historical observations and whaling records, *Clim. Change*, 92(3), 461–493, 2009.
- Landrum, L., Holland, M. M., Schneider, D. P. and Hunke, E.: Antarctic Sea Ice Climatology, Variability, and Late Twentieth-Century Change in {CCSM4}, *J. Clim.*, 25(14), 4817–4838, 2012.
- De Lavergne, C., Palter, J. B., Galbraith, E. D., Bernardello, R. and Marinov, I.: Cessation of deep convection in the open Southern Ocean under anthropogenic climate change, *Nat. Clim. Chang.*, 4(4), 278–282, 2014.
- Lefebvre, W. and Goosse, H.: An analysis of the atmospheric processes driving the large-scale winter sea ice variability in the Southern Ocean, *J. Geophys. Res.*, 113(C2), doi:10.1029/2006JC004032, 2008.
- Liu, J. and Curry, J. A.: Accelerated warming of the Southern Ocean and its impacts on the hydrological cycle and sea ice, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 107(34), 14987–14992, 2010.
- Mahlstein, I., Gent, P. R. and Solomon, S.: Historical Antarctic mean sea ice area, sea ice trends, and winds in CMIP5 simulations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 1–6, doi:10.1002/jgrd.50443, 2013.
- Polvani, L. M. and Smith, K. L.: Can natural variability explain observed Antarctic sea ice trends? New modeling evidence from CMIP5, *Geophys. Res. Lett.*, 40(12), 3195–3199, 2013.
- Pritchard, H. D., Ligtenberg, S. R. M., Fricker, H. A., Vaughan, D. G., van den Broeke, M. R. and Padman, L.: Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves, *Nature*, 484(7395), 502–505, 2012.
- Rignot, E., Bamber, J. L., van den Broeke, M. R., Davis, C., Li, Y., van de Berg, W. J. and van Meijgaard, E.: Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling, *Nat. Geosci.*, 1(2), 106–110, 2008.
- Shepherd, A., Ivins, E. R., A, G., Barletta, V. R., Bentley, M. J., Bettadpur, S., Briggs, K. H., Bromwich, D. H., Forsberg, R., Galin, N., Horwath, M., Jacobs, S., Joughin, I., King, M. A., Lenaerts,

- J. T. M., Li, J., Ligtenberg, S. R. M., Luckman, A., Luthcke, S. B., McMillan, M., Meister, R., Milne, G., Mouginot, J., Muir, A., Nicolas, J. P., Paden, J., Payne, A. J., Pritchard, H., Rignot, E., Rott, H., Sørensen, L. S., Scambos, T. A., Scheuchl, B., Schrama, E. J. O., Smith, B., Sundal, A. V., van Angelen, J. H., van de Berg, W. J., van den Broeke, M. R., Vaughan, D. G., Velicogna, I., Wahr, J., Whitehouse, P. L., Wingham, D. J., Yi, D., Young, D. and Zwally, H. J.: A Reconciled Estimate of Ice-Sheet Mass Balance, *Science* (80-. ), 338(6111), 1183–1189, doi:10.1126/science.1228102, 2012.
- Sigmond, M. and Fyfe, J. C.: Has the ozone hole contributed to increased Antarctic sea ice extent?, *Geophys. Res. Lett.*, 37(18), doi:10.1029/2010GL044301, 2010.
- Sigmond, M. and Fyfe, J. C.: The {Antarctic} Sea Ice Response to the Ozone Hole in Climate Models, *J. Clim.*, 27(3), 1336–1342, doi:10.1175/JCLI-D-13-00590.1, 2013.
- Smith, K. L., Polvani, L. M. and Marsh, D. R.: Mitigation of 21st century Antarctic sea ice loss by stratospheric ozone recovery, *Geophys. Res. Lett.*, 39(20), doi:10.1029/2012GL053325, 2012.
- Solomon, S.: Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history, *Rev. Geophys.*, 37(3), 275–316, 1999.
- Stammerjohn, S. E., Martinson, D. G., Smith, R. C., Yuan, X. and Rind, D.: Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to El Niño Southern Oscillation and Southern Annular Mode variability, *J. Geophys. Res.*, 113(C3), doi:10.1029/2007JC004269, 2008.
- Swart, N. C. and Fyfe, J. C.: Observed and simulated changes in the Southern Hemisphere surface westerly wind-stress, *Geophys. Res. Lett.*, 39(16), L16711, 2012.
- Turner, J. and Overland, J.: Contrasting climate change in the two polar regions, *Polar Res.*, 28(2), 146–164, doi:10.1111/j.1751-8369.2009.00128.x, 2009.
- Vaughan, D. G., Comiso, J. C., Allison, I., Carrasco, J., Kwok, R., Mote, P., Murray, T., Paul, F., Ren, J., Rignot, E., Solomina, O., Steffen, K. and Zhang, T.: Observations:Cryosphere, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2013.
- Velicogna, I.: Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 36(19), L19503, doi:10.1029/2009GL040222, 2009.
- Zhang, J.: Increasing {Antarctic} Sea Ice under Warming Atmospheric and Oceanic Conditions, *J. Clim.*, 20(11), 2515–2529, 2007.
- Zunz, V., Goosse, H. and Massonnet, F.: How does internal variability influence the ability of CMIP5 models to reproduce the recent trend in Southern Ocean sea ice extent?, *Cryosph.*, 7(2), 451–468, doi:10.5194/tc-7-451-2013, 2013.