

STABILISATION DU CLIMAT ET DU BILAN DE MASSE EN SURFACE DU SVALBARD MALGRÉ LE RÉCHAUFFEMENT DE L'ARCTIQUE

LANG C. ⁽¹⁾⁽²⁾, FETTWEIS X. ⁽¹⁾, ERPICUM M. ⁽¹⁾

(1) Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie, Département de Géographie, Université de Liège, 3 Clos Mercator (B11), 4000 Liège, Belgique [charlotte.lang@ulg.ac.be]

(2) Fonds pour la formation à la Recherche dans l'Industrie et l'Agriculture (FRIA), 5 Rue d'Egmont, 1000 Bruxelles, Belgique

Résumé – Nous avons modélisé le climat et le bilan de masse en surface du Svalbard sur la période 1979 – 2013 à l'aide du modèle climatique régional MAR et utilisé les sorties des réanalyses ERA-Interim afin de mettre en évidence et expliquer la stabilité des températures estivales et du bilan de masse en surface du Svalbard. En effet, entre 2006 et 2012, alors que plusieurs records de fonte ont été battus au Groenland, la température estivale et le bilan de masse en surface du Svalbard sont restés stables. Cette stabilité était causée par un changement de circulation atmosphérique en été amenant des flux de Nord sur le Svalbard et atténuant le réchauffement observé dans l'Arctique alors que des conditions anticycloniques prévalaient sur le Groenland. En 2013, la circulation atmosphérique au-dessus du Svalbard était de nouveau un flux d'Ouest (comme le flux moyen 1979 – 2005) et ne pouvait plus compenser les effets du réchauffement climatique. MAR a dès lors modélisé en 2013 la température estivale la plus élevée (0.6 °C) et le bilan de masse en surface le plus négatif (–20.4 Gt/an) de la période 1979 – 2013.

Mots-clés : Svalbard, climat, bilan de masse en surface, modélisation régionale.

Abstract – *Stable climate and surface mass balance in Svalbard over 1979 – 2013 despite the Arctic warming.* We have simulated the climate and surface mass balance of Svalbard over 1979 – 2013 with the regional climate model MAR and used the outputs of the ERA-Interim reanalysis to highlight and explain the stability of summer near-surface temperature and surface mass balance of Svalbard. Indeed, from 2006 to 2012, whereas several melt records broke over the Greenland ice sheet, summer temperature and surface mass balance remained stable in Svalbard. This stability is caused by a recent change in summer atmospheric circulation resulting in northerly fluxes damping the Arctic warming in Svalbard and anti-cyclonic conditions over the Greenland ice sheet. In 2013, the atmospheric circulation over Svalbard was again a westerly flux (like the mean 1979 – 2005 flux) and could not balance the effects of the Arctic warming anymore. As a result, MAR simulated in 2013 the highest summer temperature (0.6 °C) and the most negative surface mass balance (–20.4 Gt/yr) of the last 35 years.

Keywords : Svalbard, climate, surface mass balance, regional climate models.

Introduction

Les zones de hautes latitudes sont très sensibles aux augmentations de température (IPCC AR5, 2013) et, dans le contexte du réchauffement climatique actuel, il est très important d'évaluer l'impact de ces changements climatiques sur les régions polaires. Entre 1961 et 2004, l'Arctique a été la seconde contribution des glaciers et calottes (c'est-à-dire excluant les inlandsis du Groenland et de l'Antarctique) à l'augmentation du niveau des mers (Kaser *et al.*, 2006) et, sur la période 2003 – 2009, les glaciers et calottes ont contribué à l'augmentation du niveau de la mer autant que les inlandsis du Groenland et de l'Antarctique (Gardner *et al.*, 2013 ; Shepherd *et al.*, 2012). La fonte des glaces en Arctique représente à elle seule près de 50 % de la fonte totale des glaciers et calottes mais le Svalbard ne contribue qu'à 4 % de la contribution totale de l'Arctique (Gardner *et al.*, 2013).

Les glaciers et calottes du Svalbard, qui recouvrent 60 % de cet archipel norvégien (74-81°N, 10-35°E, Figure 1), semblent être les glaciers les moins sensibles au réchauffement estival récent constaté dans l'Arctique (Serreze *et al.*, 2009). Alors que le Groenland a battu plusieurs records de fonte en surface dans la deuxième moitié des années 2000 (Fettweis *et al.*, 2013a), le bilan de masse surface du Svalbard est resté proche de l'équilibre après 2004 (Moholdt *et al.*, 2010) et Fettweis *et al.* (2013a) ont attribué cette différence à un changement de circulation atmosphérique en été.



Figure 1. Localisation du Svalbard. D'après <http://toposvalbard.npolar.no/> et <http://europa.ned.dlr.de>

Le bilan de masse d'un glacier est un bilan d'eau calculant sur une période donnée la différence entre les gains en masse (accumulation) et les pertes (ablation) et le bilan de masse en surface (SMB, *Surface Mass Balance*) est la composante qui ne prend en compte que les processus de surface (précipitations liquides et solides, ruissellement de l'eau de fonte et sublimation et évaporation) et néglige les processus dynamiques (vêlage des icebergs par exemple) du bilan de masse.

Nous avons modélisé le climat et le bilan de masse en surface du Svalbard à l'aide du modèle climatique régional MAR et utilisé les réanalyses ERA-Interim sur la période 1979 – 2013 afin de mettre en évidence et expliquer la stabilité récente des températures estivales et du bilan de masse en surface au Svalbard.

1. Modèles et simulations

MAR (Modèle Atmosphérique Régional, Gallée et Schayes, 1994) est un modèle climatique régional développé au départ pour étudier les régions polaires. MAR est composé d'un modèle atmosphérique couplé à un modèle de sol comprenant entre autres un module calculant le bilan d'énergie à la surface du manteau neigeux. Nous avons réalisé des simulations du climat et du bilan de masse en surface du Svalbard entre 1979 et 2013 à une résolution spatiale de 10 km. Les frontières du domaine ainsi que l'océan étaient forcées toutes les 6h par les réanalyses ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011): température, vent et humidité à chaque niveau vertical et température de surface et glace de mer sur l'océan. MAR a été évalué de manière extensive sur le Groenland (p. ex. Fettweis *et al.*, (2013b) et Franco *et al.* (2013) et les références qui y figurent) ainsi que sur le Svalbard (Lang *et al.*, 2015).

2. Résultats

Le bilan de masse en surface simulé par MAR et intégré sur toutes les régions englacées du Svalbard vaut -1.6 ± 7.1 Gt/an en moyenne sur la période 1979 – 2013 (Figure 2). La très grande variabilité interannuelle (donnée par l'écart-type de 7.1 Gt) est principalement causée par la variabilité du ruissellement de l'eau de fonte ($R^2 = 0.85$ entre le SMB et le ruissellement), elle-même due en grande partie due à la variabilité interannuelle de la température estivale (TAS_{JJA} , JJA = juin-juillet-août).

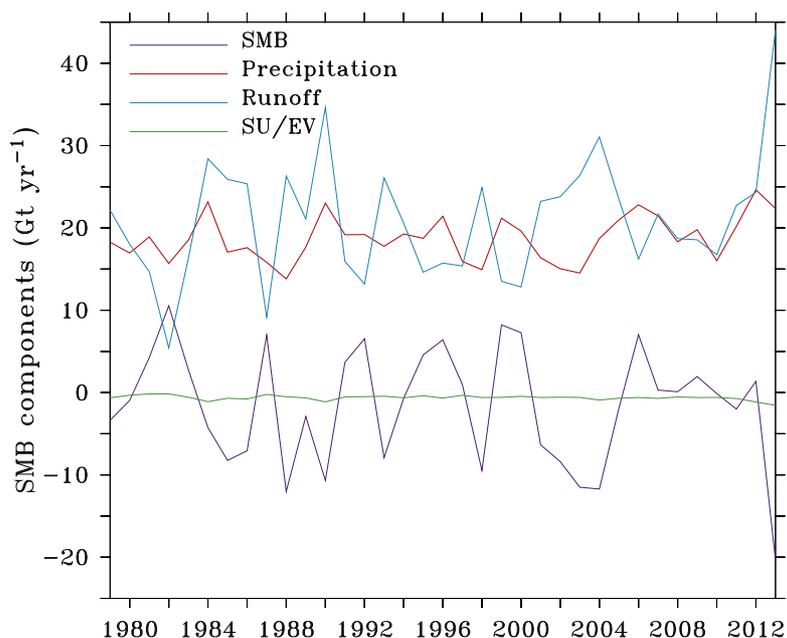


Figure 2. Evolution temporelle (1979 – 2013) du SMB et de ses composantes (Gt/an) simulées par MAR intégrés sur toutes les zones englacées.

Des mesures réalisées sur des glaciers à partir des années 1960 montrent une stabilité du bilan de masse en surface jusqu'à la fin des années 1990 (Hagen *et al.*, 2003) et les références qui y figurent). Le bilan de masse en surface de ces glaciers localisés à la côte était néanmoins négatif, indiquant que les glaciers perdaient de la glace mais sans que la fonte en surface ne s'accroisse ou ne diminue. Cependant, certains glaciers comme Kongsvegen et Kronebreen ont vu leur fonte augmenter à la fin des années 1990 (Nuth *et al.*, 2012) mais leur bilan de masse en surface s'est ensuite stabilisé dans la deuxième moitié des années 2000. La tendance linéaire du SMB modélisé par MAR et intégré sur tout le Svalbard est faible et pas statistiquement significative sur la période 1979 – 2013 (-0.1 Gt/an^2) et suggère donc une stabilité du bilan de masse en surface sur les 35 dernières années à l'échelle de tout le Svalbard. Cependant, les biais associés à l'utilisation d'une topographie à 10 km de résolution (fonte accrue causé par la sous-estimation de l'altitude mais aussi biais de précipitations) ne nous permettent pas d'affirmer que le SMB intégré sur tout le Svalbard est réellement négatif comme c'est le cas pour les glaciers côtiers pris individuellement, étant donné que le SMB modélisé par MAR est très proche de l'équilibre. Moholdt *et al.* (2010) ont mis en évidence un bilan de masse en surface très négatif en 2003 – 2004, suivi de valeurs plus proches de l'équilibre entre 2004 et 2007. MAR simule également des valeurs très négatives en 2003 et 2004 (environ -12 Gt/an) et des valeurs proches de l'équilibre entre 2005 et 2012. Nous pouvons donc conclure que le bilan de masse en surface intégré sur toutes les régions englacées du Svalbard est resté stable (tout en étant négatif d'après MAR) ces 35 dernières années.

Cette tendance récente à la stabilité s'oppose cependant à ce qui a été observé ou modélisé sur l'inlandsis du Groenland, où le SMB est resté stable jusqu'à la fin des années 1990 et où plusieurs records de fonte ont eu lieu depuis 2006, et peut être expliquée par le changement récent de circulation atmosphérique en été causant des flux de Sud plus fréquents sur le Groenland et des flux de Nord sur le Svalbard (Fettweis *et al.*, 2013a). Sur le Svalbard, la circulation atmosphérique à 700 hPa estivale moyenne entre 1979 et 2005 était un flux d'ouest ou ouest-sud-ouest (Figure 3a).

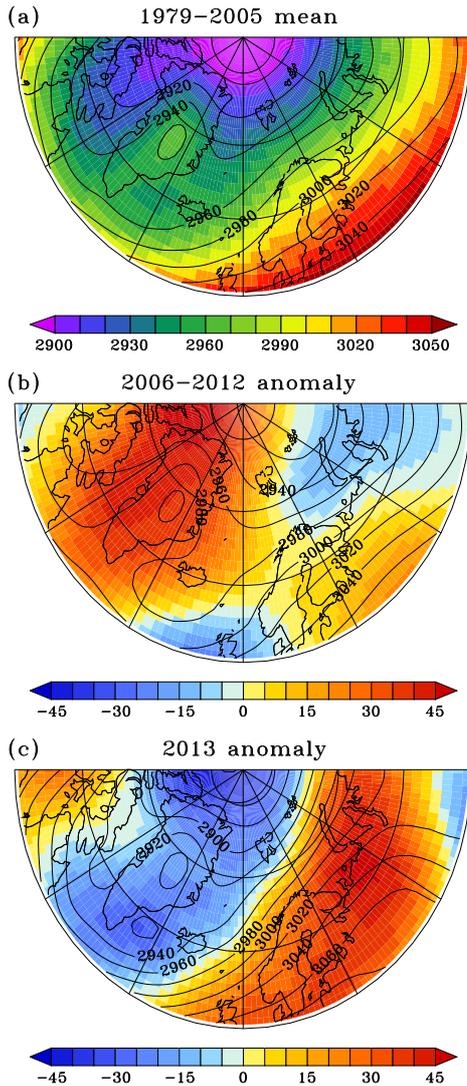


Figure 3. (a) Hauteur géopotentielle à 700 hPa estivale ($Z700_{JJA}$) moyenne (1979 – 2005) (m) simulée par ERA-Interim. (b) Différence de $Z700_{JJA}$ (m) moyenne sur 2006 – 2012 par rapport à 1979 – 2005. (c) Idem que (b) pour 2013. Les courbes noires représentent $Z700_{JJA}$ moyenne pour chaque période.

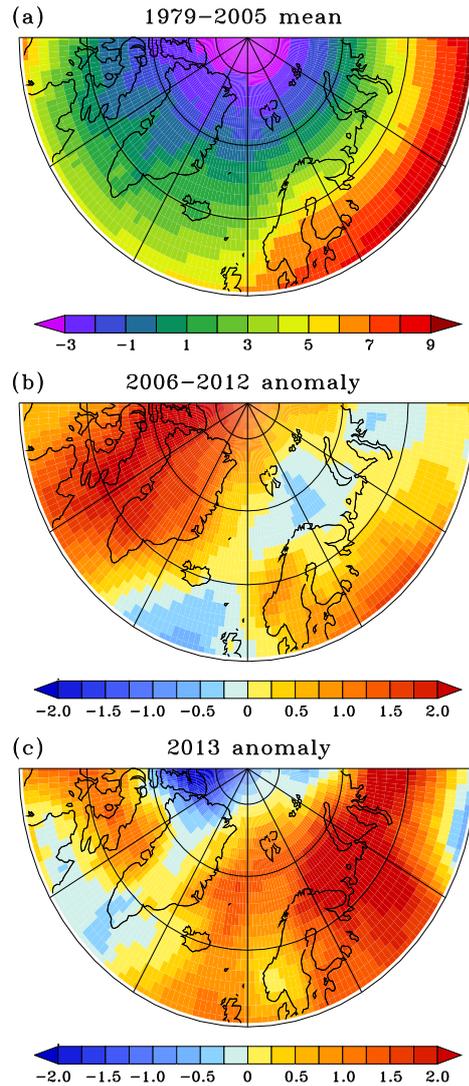


Figure 4. (a) $T850_{JJA}$ moyenne (1979 – 2005) (°C) simulée par ERA-Interim. (b) Différence de $T850_{JJA}$ moyenne (°C) sur 2006 – 2012 par rapport à 1979 – 2005. (c) Idem que (b) pour 2013.

Après 2005 cependant, la circulation estivale a changé suite à une série de phases négatives plus fréquentes de l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO, *North Atlantic Oscillation*) en été. $Z700_{JJA}$ (hauteur géopotentielle à 700 hPa en été, représentant la circulation atmosphérique en altitude) a plus augmenté sur le Groenland que sur le Svalbard (Figure 3b), résultant en des flux de NO sur le Svalbard et des conditions plus anticycloniques sur le Groenland (Fettweis *et al.*, 2013a). En conséquence, une augmentation des températures estivales causant des records de fonte a été observée depuis 2006 au Groenland (Fettweis *et al.*, 2013a). Au Svalbard, au contraire, le flux de NO apporte de l'air plus froid (Figure 4b, montrant, pour ERA-Interim, la température estivale à 850 hPa ($T850_{JJA}$), responsable de la variabilité de la fonte selon Fettweis *et al.* (2013a)) et le bilan de masse en surface est resté stable sur toute la période 1979 – 2012 alors qu'un réchauffement était observé dans l'Arctique (Anisimov *et al.*, 2007). En 2013, la circulation atmosphérique à 700 hPa était de nouveau un flux d'ouest en été et n'a plus pu s'opposer au réchauffement de l'Arctique. Par conséquent, l'anomalie de

$T_{850_{JJA}}$ par rapport à la période 1979 – 2005 (Figure 4c) était positive en 2013, au contraire de 2006 – 2012, et MAR a simulé cette année-là la température estivale la plus élevée des 35 années (Figure 5), causant un record de ruissellement d'eau de fonte en surface (44.1 Gt/an, Figure 2). Le SMB simulé présentait aussi la valeur la plus basse de la période 1979 – 2013 (–20.4 Gt/an) alors que la quantité de précipitations était supérieure à la moyenne mais pas significativement différente.

Le changement récent de circulation atmosphérique estivale à 700 hPa, atténuant les effets du réchauffement climatique en Arctique au Svalbard, est aussi responsable de la stabilisation de la température estivale (TAS_{JJA} simulé par MAR sur la Figure 5) dans la seconde moitié des années 2000, qui s'oppose à ce qui a été observé au Groenland. Sur les 35 dernières années, la température annuelle au Svalbard a augmenté en moyenne de 2.8 °C, alors que l'augmentation de température estivale est plus modérée (0.79 °C).

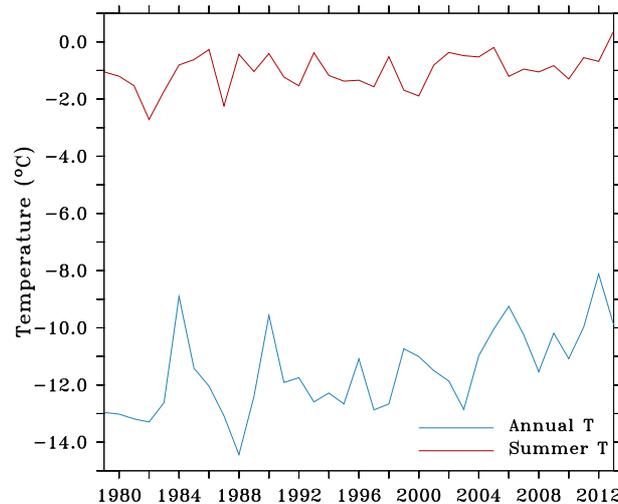


Figure 5. Evolution temporelle (1979 – 2013) de la température annuelle (courbe bleue) et estivale (courbe rouge) moyenne (°C) des zones englacées simulée par MAR.

Ces 2 tendances linéaires sont statistiquement significatives mais, pour la température estivale, la très haute valeur de l'année 2013 a énormément d'influence sur la valeur de la tendance étant donné sa position à la fin de la série temporelle. Si nous excluons l'été 2013, la tendance estivale de température n'est pas significative.

Les quantités annuelles moyennes de précipitations et de ruissellement de l'eau de fonte sont semblables (8.7 et 20.9 Gt/an, Figure 2) mais la quantité de précipitations varie très peu d'année en année (variabilité interannuelle de 2.7 Gt/an) tandis que la variabilité interannuelle du ruissellement est élevée (7.4 Gt/an). La sublimation et l'évaporation, quant à elles, sont également assez constantes et contribuent très peu au bilan de masse en surface. Les valeurs sont négatives chaque année et indiquent que MAR simule une plus grande formation de givre qu'évaporation. De nouveau, aucune des tendances linéaires n'est significative sur la période 1979 – 2013.

Conclusion

Nous avons montré, à l'aide du modèle climatique régional MAR, que la température estivale et le bilan de masse en surface du Svalbard étaient restés stables entre 1979 et 2012 années alors que le Groenland a connu plusieurs records de fonte depuis 2006. Cette stabilité est attribuée à un changement de circulation atmosphérique estivale entre 2006 et 2012, amenant de l'air froid du NO au Svalbard et s'opposant au réchauffement climatique observé dans l'Arctique. En 2013, la circulation moyenne d'ouest qui prévalait avant 2006 s'étant rétablie, elle ne pouvait plus contrebalancer les effets du réchauffement estival et MAR a

modélisé cette année là la température la plus élevée et le SMB le plus négatif de la période 1979 – 2013.

Références bibliographiques

Anisimov O.A., Vaughan D.G., Callaghan T.V., Furgal C., Marchant H., Prowse T.D., Vilhjálmsson H., Walsh J.E., Parry M. L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E., 2007 : *Polar Regions (Arctic and Antarctic), Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 653-685.

Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F., 2011 : The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. Journal of the Royal Meteorological Society*, **137**, 553-597.

Fettweis X., Hanna E., Lang C., Belleflamme A., Erpicum M., Gallée H., 2013a : Important role of the midtropospheric atmospheric circulation in the recent surface melt increase over the Greenland ice sheet. *The Cryosphere*, **7**, 241-248.

Fettweis X., Franco B., Tedesco M., van Angelen J.H., Lenaerts J.T.M., van den Broeke M.R., Gallée H., 2013b : Estimating the Greenland ice sheet surface mass balance contribution to future sea level rise using the regional atmospheric climate model MAR. *The Cryosphere*, **7**, 469-489.

Franco B., Fettweis X., Erpicum M., 2013 : Future projections of the Greenland ice sheet energy balance driving the surface melt. *The Cryosphere*, **7**, 1-18.

Gallée H., Schayes G., 1994 : Development of a three-dimensional meso- γ primitive equation model: katabatic winds simulation in the area of Terra Nova Bay, Antarctica. *Monthly Weather Review*, **122**, 671-685.

Gardner A.S., Moholdt G., Cogley J.G., Wouters B., Arendt A.A., Wahr J., Berthier E., Hock R., Pfeffer W.T., Kaser G., Ligtenberg S.R.M., Bolch T., Sharp M. J., Hagen J.O., van den Broeke M.R., Paul F., 2013 : A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. *Science*, **340**, 852-857.

Hagen, J.O., Melvold K., Pinglot, F., Dowdeswell J.A., 2003 : On the net mass balance of the glaciers and ice caps in Svalbard, Norwegian Arctic, *Arctic Antarctic and Alpine Research*, **35**, 264-270.

IPCC, Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M., 2013 : *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1535 p.

Kaser G., Cogley J.G., Dyurgerov M.B., Meier M.F., Ohmura A., 2006 : Mass balance of glaciers and ice caps: consensus estimates for 1961-2004. *Geophysical Research Letters*, **33**, L19501.

Lang C., Fettweis X., Erpicum M., 2015 : Stable climate and surface mass balance in Svalbard over 1979-2013 despite the Arctic warming. *The Cryosphere*, **9**, 83-101.

Moholdt G., Nuth C., Hagen J.O., Kohler J., 2010 : Recent elevation changes of Svalbard glaciers derived from ICESat laser altimetry. *Remote Sensing of Environment*, **114**, 2756-2767.

Nuth C., Schuler T.V., Kohler J., Altena B., Hagen J.O., 2012 : Estimating the long-term calving flux of Kronebreen, Svalbard, from geodetic elevation changes and mass-balance modeling. *Journal of Glaciology*, **58**, 119-133.

Serreze M.C., Barrett A.P., Stroeve J.C., Kindig D.N., Holland M.M., 2009 : The emergence of surface-based Arctic amplification. *The Cryosphere*, **3**, 11-19.

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., 2012 : A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science*, **338**, 1183-1189.