

CONTRIBUTION DU BILAN DE MASSE DE SURFACE ANTARCTIQUE À L'ÉVOLUTION DU NIVEAU DES MERS AVEC LE MODÈLE ATMOSPHÉRIQUE RÉGIONAL MAR

AGOSTA C. ⁽¹⁾, FETTWEIS X. ⁽¹⁾, GALLÉE H. ⁽²⁾

(1) Laboratoire de climatologie et topoclimatologie, Département de Géographie, Université de Liège, Liège, Belgique [cecile.agosta@gmail.com, xavier.fettweis@ulg.ac.be]

(2) Grenoble 1 / CNRS, Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE) UMR 5183, 54 rue Molières, 38400 Saint Martin d'Hères [gallee@lgge.obs.ujf-grenoble.fr]

Résumé – Le bilan de masse de surface (BMS) Antarctique, composante significative du budget des océans, ne peut pas être déterminé directement à partir des modèles de climat globaux. Nous présentons ici de nouvelles estimations du BMS Antarctique avec le modèle atmosphérique régional MAR. Nous commençons par évaluer les modèles de climat globaux de la base de données CMIP5, qui servent de forçage au MAR, en les comparant à la réanalyse ERA-Interim sur la région Antarctique. Cela nous permet de sélectionner le modèle global le moins biaisé pour forcer MAR : ACCESSI-3. Nous évaluons nos résultats de simulation en comparant MAR forcé par ERA-Interim et par ACCESSI-3 à des observations de BMS de qualité contrôlée et à des observations de température de surface. Nous montrons que les simulations MAR semblent représenter correctement le climat actuel, bien qu'une évaluation plus poussée à l'aide de données satellites soit requise.

Mots-clés : bilan de masse de surface, niveau des mers, Antarctique, modélisation régionale, évaluation.

Abstract – *Estimating Antarctic surface mass balance contribution to sea-level rise with the regional atmospheric model MAR.* The Antarctic ice-sheet surface mass balance (SMB) is a significant component of the sea level budget but it cannot directly be deduced from global climate models (GCMs) outputs. We present here new estimations of the Antarctic SMB with the MAR (Modèle Atmosphérique Régional) regional climate model. We first evaluate CMIP5 GCMs by comparing them to the ERA-Interim reanalysis over the Antarctic region, from which we could select the less biased large-scale forcing for MAR: ACCESSI-3. We evaluate MAR outputs by comparing MAR forced by ACCESSI-3 and by ERA-Interim for the 1980-2000 period to more than 2700 quality-controlled SMB observations and to surface meteorological data from the READER database. We show that our results compare well with these observations, but further evaluation with remote-sensing data is required.

Keywords: surface mass balance, sea-level, Antarctica, regional modelling, model evaluation.

Introduction

L'apport d'eau douce dans l'océan par les calottes glaciaires de l'Antarctique et du Groenland résulte de la différence entre le Bilan de Masse de Surface (BMS, qui correspond à l'accumulation par les précipitations moins l'ablation par sublimation/évaporation, ruissellement d'eau liquide et transport/érosion par le vent) et le flux de glace (décharge d'icebergs) vers l'océan, tous deux encore mal connus. En Antarctique, les flux de glace sont en augmentation (Rignot *et al.*, 2011), mais ceux-ci pourraient être compensés au cours de ce siècle par l'accroissement de l'accumulation de neige due à un air plus chaud et donc plus chargé en humidité (Agosta *et al.*, 2013). Une meilleure quantification du BMS de la calotte Antarctique est cruciale car les variations de cette composante contribuent directement et significativement à l'évolution du niveau des mers et de grandes incertitudes lui sont encore associées.

L'estimation du BMS met en jeu la compréhension et la modélisation de processus physiques complexes. L'accumulation par les précipitations résulte de l'interaction entre la circulation de grande échelle et la topographie. De plus, elle nécessite une représentation correcte de la microphysique nuageuse en conditions froides. La fonte du manteau neigeux dépend de processus à seuils fortement non-linéaires et est amplifiée par sa rétroaction avec l'état de surface (albédo) de la neige. Le regel d'une partie de l'eau liquide percolant dans les couches de neige nécessite une représentation fine du manteau neigeux. Enfin, le transport/érosion de neige par le vent est particulièrement important en Antarctique où l'étendue de la calotte permet l'établissement d'un régime catabatique de grande échelle. La variabilité du BMS est la plus marquée en région périphérique des calottes car c'est dans cette zone que le ruissellement de l'eau de fonte/pluie a lieu, que les chutes de neige sont les plus

importantes et que l'intensité des vents catabatiques est la plus forte. Or c'est également dans cette région que l'on trouve les plus fortes variations de topographie avec des pentes relativement abruptes et un relief accidenté alors que l'intérieur des calottes est caractérisé par des pentes très douces.

La grande majorité des modèles atmosphériques globaux ne sont pas capables de représenter correctement le BMS des calottes polaires car leur physique n'est pas adaptée aux régions froides et englacées et leur résolution horizontale (~100 km) ne leur permet pas de résoudre correctement les processus clés en périphérie des calottes, en particulier la zone d'accumulation et ablation. Face aux modèles globaux, les modèles régionaux MAR (Modèle Atmosphérique Régional) et RACMO, développés et intensivement validés pour les régions polaires, font référence pour l'étude du bilan de masse des calottes de glace (voir par exemple Fettweis *et al.* (2013) pour MAR et Lenaerts *et al.* (2012) pour RACMO). Leurs avantages sont (i) des paramétrisations physiques adaptées (module de surface de neige/glace élaboré, physique de l'atmosphère adaptée aux conditions froides) (ii) une haute résolution spatiale (au mieux 40 km pour l'Antarctique pour des simulations à l'échelle du siècle) (iii) le choix d'un forçage de grande échelle le moins biaisé parmi les réanalyses et modèles globaux de climat disponibles. Ce choix est crucial car il est à l'origine de la principale incertitude sur le BMS, comme montré par Rae *et al.* (2012) pour le Groenland et confirmé par nos études en cours pour l'Antarctique.

Nous montrons par la suite qu'ACCESS1-3 est le modèle de climat global de la base de données CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project) le moins biaisé par rapport à la réanalyse ERA-Interim pour la région Antarctique, puis nous évaluons nos résultats de simulation en comparant MAR forcé par ERA-Interim et par ACCESS1-3 à plus de 2700 observations de BMS de qualité contrôlée et à des mesures de température de l'air en surface de la calotte.

1. Modèles, observations et méthodes

1.1. Le modèle atmosphérique régional MAR

Le modèle MAR a d'abord été développé en Belgique dans le cadre du programme Antarctique belge (Gallée et Schayes, 1994). Il continue à être développé par Hubert Gallée au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement de Grenoble, France, et au laboratoire de climatologie de l'Université de Liège, Belgique. MAR est un modèle utilisant les équations de Navier-Stokes pour décrire le mouvement des fluides parfaits en milieu continu et poser l'hypothèse hydrostatique du modèle. Les paramétrisations en sous-maillages comportent un modèle de rayonnement, un modèle de microphysique nuageuse pronostique et un modèle de la turbulence atmosphérique basé sur des équations pronostiques sur l'énergie cinétique turbulente et sa dissipation. MAR a été couplé à un modèle de neige (Gallée et Duynkerke, 1996) intégrant les lois d'évolution des propriétés de la neige du modèle CROCUS, ainsi que celles régissant l'érosion de la neige par le vent et l'interaction avec la turbulence. Cependant, nous présentons ici les résultats du modèle sans transport de neige par le vent.

1.2. Forçages de grande échelle : réanalyses et modèles de climat globaux

La réanalyse ERA-Interim est fournie par le Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme et couvre la période 1979-présent. Plusieurs études (par exemple Bromwich *et al.*, 2011; Bracegirdle *et al.*, 2012) ont montré que ERA-Interim est la réanalyse qui présente les meilleures performances pour la région Antarctique à l'heure actuelle. Nous considérons donc ERA-Interim sur la période 1980-2013 comme la référence de l'état de

l'atmosphère dans la région Antarctique. Afin de prendre en compte les incertitudes liées à la réanalyse, nous incorporons également 4 autres réanalyses lors de l'évaluation des modèles : « the Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications » (MERRA) (Rienecker *et al.*, 2011), « the NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project » (NCEP-NCAR-v1) (Kalnay *et al.*, 1996), « the NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis-2 » (NCEP-DOE-v2) (Kanamitsu *et al.*, 2002), et « the Twentieth Century Reanalysis v2 » (NOAA-20CR-v2) (Compo *et al.*, 2011).

Nous évaluons 38 modèles de climat globaux extraits de la base de données CMIP5, qui regroupe les résultats des modèles globaux avec couplage océan-atmosphère utilisés pour le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (Taylor *et al.*, 2012). Les données des modèles (CMIP5 et réanalyses) sont extraites en moyenne mensuelle et interpolées sur une grille régulière en longitude-latitude ($1,5^\circ \times 1,5^\circ$).

1.3. Observations de surface

Nous confrontons les données de BMS obtenues avec MAR aux 2700 observations de qualité contrôlée GLACIOCLIM-SAMBA répertoriées par Favier *et al.* (2013) et aux températures à 2 mètres répertoriées dans la base de données READER (REference Antarctic Data for Environmental Research) (Turner *et al.*, 2004). La localisation de ces données est présentée en Figure 1.

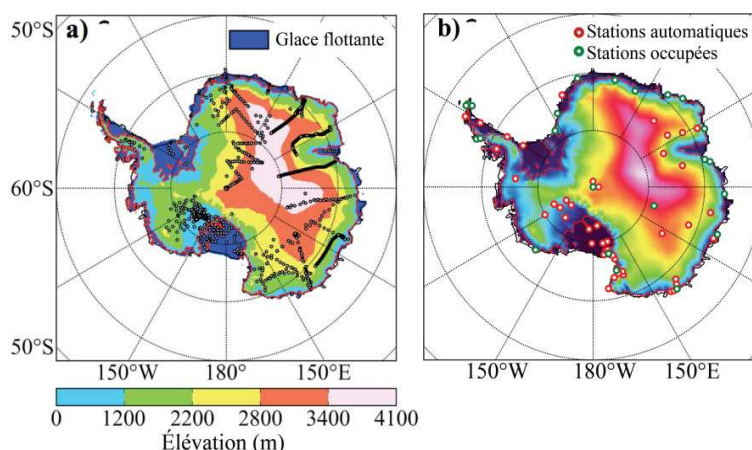


Figure 1. Localisation des observations a) de BMS de la base de données GLACIOCLIM-SAMBA et b) météorologiques de surface de la base de données READER.

1.4. Méthodes

Pour l'évaluation des modèles globaux de climat, nous nous sommes concentrés sur les champs de forçage du MAR ayant le plus grand impact sur le BMS Antarctique :

- la pression de surface annuelle (psl, pour « sea-level pressure ») est un indicateur de la circulation de grande échelle qui influence les précipitations (unité : hPa).
- la quantité totale de vapeur d'eau dans la colonne d'air (prw, pour « precipitable water », en kg/m^2) correspond au stock d'humidité et influence les précipitations.
- la concentration en glace de mer (sic, pour « sea-ice concentration », en %), utilisée comme condition limite océanique du MAR. Nous considérons la saison hivernale car en été la glace de mer disparaît presque entièrement en Antarctique.
- la température de l'air à 850hPa (ta850hPa, en K) influence la fonte en été et la température de l'air à l'intérieur du domaine du modèle régional. Cette variable a un effet direct sur les flux de surface entre la neige et l'atmosphère.

Nous utilisons comme critères le biais et la RMSE centrée par rapport à ERA-Interim. Nous considérons le domaine 40°S–90°S en masquant les zones couvertes par les continents.

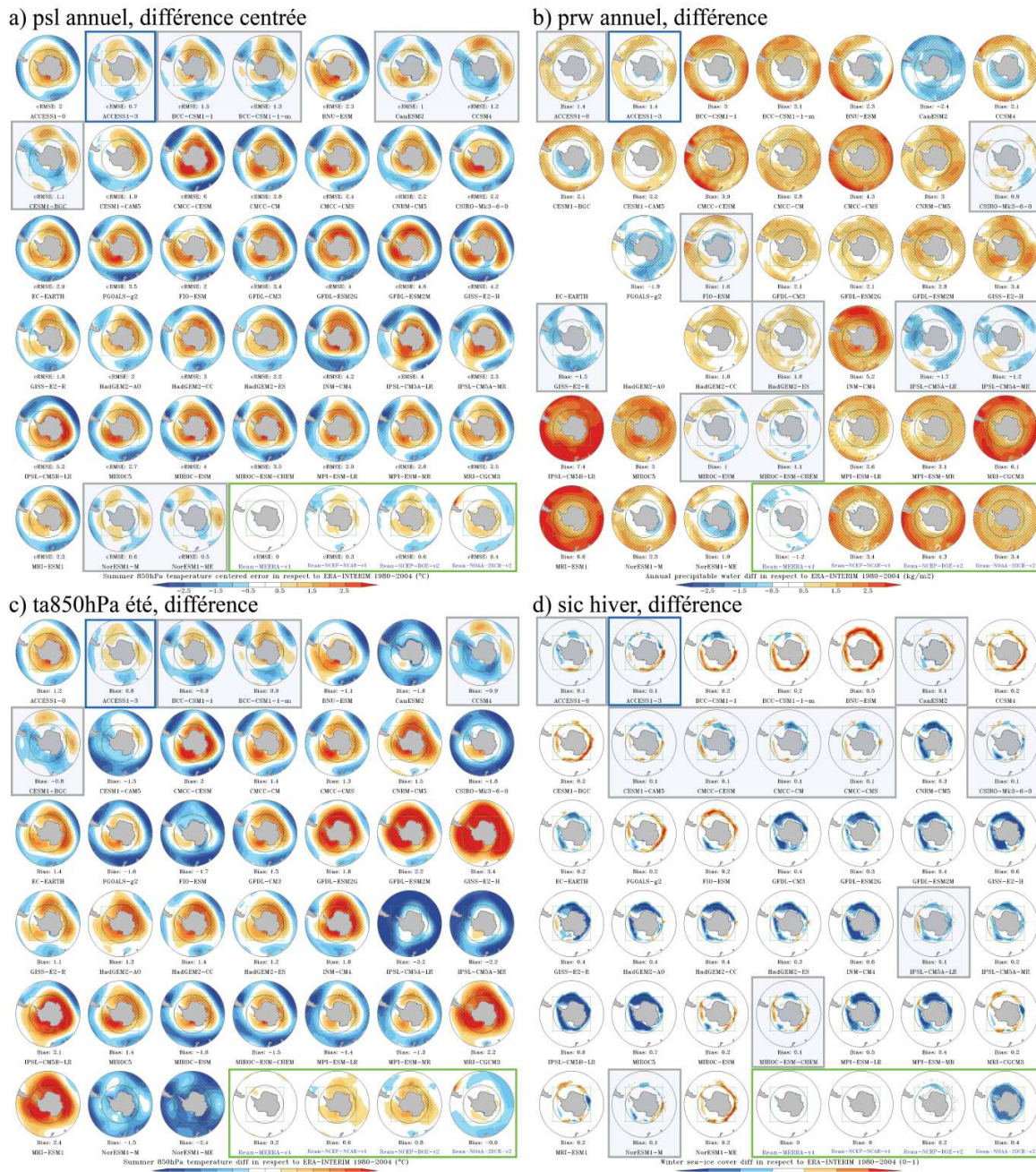


Figure 2. Différence en moyenne temporelle pour la période 1980-2000 entre 38 modèles de CMIP5 et 4 réanalyses (encadrées en vert) avec ERA-Interim. Les modèles encadrés en gris sont ceux présentant un biais limité par rapport à ERA-Interim. ACCESS1-3 est encadré en bleu.

2. Résultats

La Figure 2 résume les performances des 38 modèles de CMIP5 et des 4 réanalyses par rapport à ERA-Interim pour les quatre variables décrites à la section 1.4. Les 4 réanalyses sont proches de ERA-Interim, excepté pour la quantité totale de vapeur d'eau annuelle pour laquelle NCEP-NCAR-v1, NCEP-DOE-v2 et NOAA-20CR présentent un biais positif significatif, déjà noté dans de précédents travaux (par exemple Nicolas et Bromwich, 2011). NOAA-20CR présente également un biais pour l'étendue de glace de mer hivernale, variable

qui a été incorrectement assimilée dans cette réanalyse. Concernant les performances des 38 modèles de CMIP5, ACCESS1-3 est le seul modèle à présenter des biais limités par rapport à ERA-Interim pour les 4 variables sélectionnées. Nous considérons donc que le choix de ce modèle est le plus pertinent pour estimer l'évolution du BMS au cours du 21^{ème} siècle.

Une première étape vers cet objectif consiste à forcer MAR avec ERA-Interim et avec ACCESS1-3 pour le climat présent (1980-2005) afin d'évaluer les performances de MAR en Antarctique. Les comparaisons des résultats de ces simulations avec les observations de surface décrites à la section 1.3 sont présentées à la Figure 3. Concernant le BMS (Fig. 3a), il n'existe pas de différence significative entre les performances de MAR-ERA-Interim et de MAR-ACCESS1-3. De plus, le BMS modélisé ne présente pas de biais significatif par rapport aux observations pour l'ensemble des classes d'élévation, sauf pour la zone de glace flottante où l'on observe un biais négatif. D'autre part, MAR représente correctement la température de l'air à 2 mètres (Fig. 3b), forcé par ERA-Interim comme par ACCESS1-3 (non montré ici), avec toutefois un biais chaud en hiver pour les stations les plus élevées.

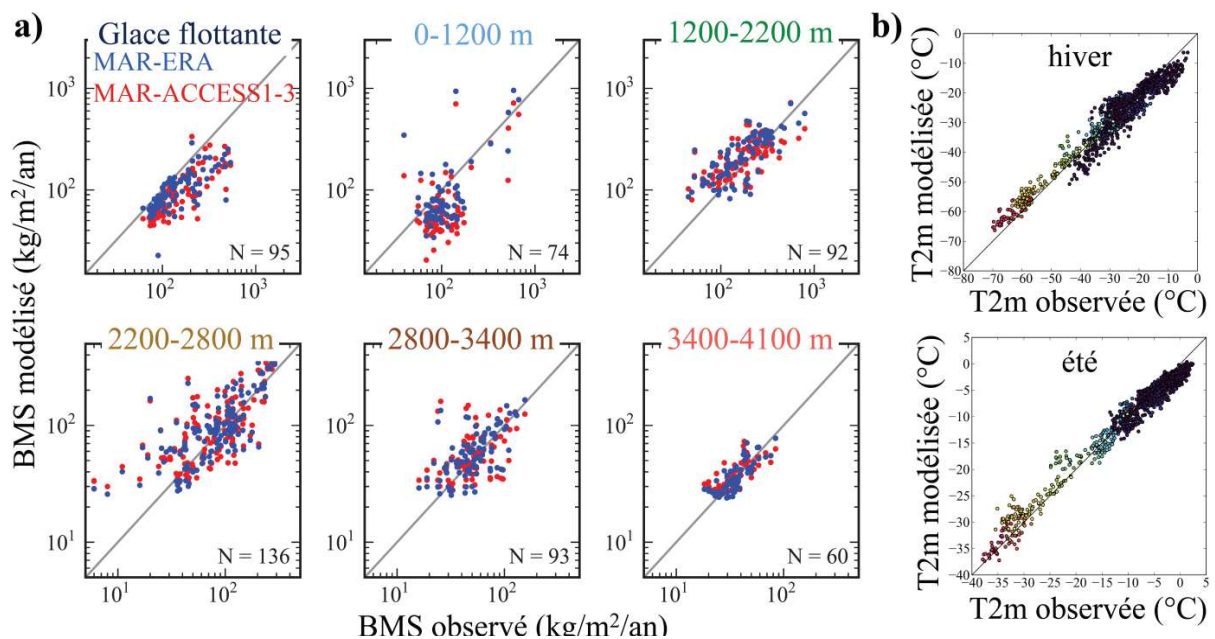


Figure 3. a) BMS observé (GLACIOCLIM-SAMBA) et modélisé par MAR-ERA-Interim (bleu) et MAR-ACCESS1-3 (rouge), par classe d'élévation (voir Figure 1a). b) Température à 2 mètres observée (READER) et simulée par MAR-ERA-Interim. La couleur des points correspond à l'élévation des stations (voir Fig. 1b).

Discussion et conclusion

Parmi les 38 modèles de CMIP5 analysés, un seul, ACCESS1-3, présente des biais limités pour les champs ayant le plus fort impact sur le BMS simulé avec le modèle régional MAR. Il est à noter que nous avons utilisé les simulations couplées océan-atmosphère, et qu'il serait intéressant de savoir quelle est la part d'erreur de ces modèles liée au couplage avec les modèles d'océan. Pour cela, nous comptons analyser les simulations CMIP5 forcées avec les conditions de surface océaniques observées. Si les biais sont réduits dans ces simulations, alors cela pourrait inciter à recommander l'utilisation de méthodes d'anomalies pour les conditions de surface océaniques dans le cadre du prochain exercice CMIP.

Par ailleurs, les résultats de MAR-ACCESS1-3 sont proches de ceux obtenus avec MAR-ERA-Interim, et ces simulations donnent des résultats satisfaisants en comparaison avec les observations de surface de BMS et de température à 2 mètres dont nous disposons. Cela nous donne confiance en nos futures simulations avec MAR-ACCESS1-3 pour le 21^{ème} siècle.

Cependant, les observations de terrain utilisées sont éparées et mal réparties sur l'immense continent Antarctique. C'est pourquoi nos travaux futurs se concentreront également sur l'évaluation de MAR à partir des données satellites disponibles.

Références bibliographiques

- Agosta C., Favier V., Krinner G., Gallée H., Fettweis X., 2013 : High-resolution modelling of the Antarctic surface mass balance, application for the twentieth, twenty first and twenty second centuries. *Clim. Dyn.*, **41**, 3247-3260. doi:10.1007/s00382-013-1903-9.
- Bracegirdle T.J., Marshall G.J., 2012 : The reliability of Antarctic tropospheric pressure and temperature in the latest global reanalyses. *J. Climate*, **25**, 7138-7146. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00685.1.
- Bromwich D.H., Nicolas J.P., Monaghan A.J., 2011 : An assessment of precipitation changes over Antarctica and the southern ocean since 1989 in contemporary global reanalyses. *J. Climate*, **24**, 4189-4209.
- Compo, G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D., Matsui N., Allan R.J., Yin X., Gleason B.E., R.S. Vose, G. Rutledge, P. Bessemoulin, *et al.*, 2011 : The Twentieth Century Reanalysis Project. *Q. J. R. Meteorolog. Soc.*, **137**, 1-28. doi: 10.1002/qj.776
- Favier V., Agosta C., Parouty S., Durand G., Delaygue G., Gallée H., Drouet A.-S., Trouvillez A., Krinner G., 2013 : An updated and quality controlled surface mass balance dataset for Antarctica. *The Cryosphere*, **7**, 583-597. doi:10.5194/tc-7-583-2013.
- Fettweis X., Franco B., Tedesco M., van Angelen J.H., Lenaerts J.T., van den Broeke M.R., Gallée H., 2013 : Estimating Greenland ice sheet surface mass balance contribution to future sea level rise using the regional atmospheric climate model MAR. *The Cryosphere*, **7**, 469-489. doi:10.5194/tc-7-469-2013.
- Gallée H., Schayes G., 1994 : Development of a three-dimensional meso-gamma primitive equations model, katabatic winds simulation in the area of Terra Nova Bay, Antarctica. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 671-685.
- Gallée H., Duynkerke P. G., 1996 : Air-snow interactions and the surface energy and mass balance over the melting zone of West Greenland during GIMEX. *J. Geophys. Res.*, **102**, 13813-13824.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., *et al.*, 1996 : The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Am. Meteorolog. Soc.*, **77**, 437-471.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.-K., Hnilo J. J., Fiorino M., Potter G. L., 2002 : NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Am. Meteorolog. Soc.*, **83**, 1631-1643. doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Lenaerts J.T., van den Broeke M.R., van de Berg W.J., van Meijgaard E., Munneke P.K., 2012 : A new, high-resolution surface mass balance map of Antarctica (1979–2010) based on regional atmospheric climate modeling. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L04501. doi:10.1029/2011GL050713.
- Nicolas J.P., Bromwich D.H., 2011 : Precipitation Changes in High Southern Latitudes from Global Reanalyses: A Cautionary Tale. *Surv. Geophys.*, **32**, 475-494.
- Rae J.G.L., Aðalgeirsdóttir G., Edwards T.L., Fettweis X., Gregory J.M., Hewitt H.T., Lowe J.A., Lucas-Picher P., Mottram R.H., Payne A.J., *et al.*, 2012 : Greenland ice sheet surface mass balance: evaluating simulations and making projections with regional climate models. *The Cryosphere*, **6**, 1275-1294.
- Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M.G., Schubert S.D., Takacs L., Kim G.-K., *et al.*, 2011 : MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *J. Climate*, **24**, 3624-3648. doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
- Rignot E., Velicogna I., van den Broeke M.R., Monaghan A.J., et Lenaerts J.T., 2011 : Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L05503.
- Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A., 2012 : An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Am. Meteorolog. Soc.*, **93**, 485-498. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Turner J., Colwell S.R., Marshall G.J., Lachlan-Cope T.A., Carleton A.M., Jones P.D., Lagun V., Reid P.A., Jagovkina S., 2004 : The SCAR READER Project: Toward a High-Quality Database of Mean Antarctic Meteorological Observations. *J. Climate*, **17**, 2890-2898.