

6

Régions polaires, cryosphère, circulation thermohaline

David Salas y Mélia (1) et Christophe Genthon (2)
(1) CNRM/GMGEC/UDC, Météo-France
42 avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse cedex 01.
Email : david.salas@meteo.fr
(2) LGGE, CNRS/UJF UMR 5183
54 rue Molière, 38402 Saint Martin d'Hères cedex.
Email : Christophe.Genthon@lgge.obs.ujf-grenoble.fr

Contributions :

Olivier Arzel (UCL), Christophe Cassou (CERFACS), Virginie Guemas (CNRM), Gerhard Krinner (LGGE), Marie Minvielle (CERFACS) et Didier Swingedouw (LSCE).

La place des régions polaires dans le système climatique global

Régions polaires : un système climatique sensible et en évolution rapide

Les hautes latitudes des deux hémisphères concentrent une grande partie de la cryosphère marine et terrestre (glace de mer, neige, calottes et glaciers) et sont, avec la Méditerranée, les seules régions du globe permettant le déclenchement de la convection océanique profonde, principal moteur de la circulation thermohaline globale.

Dans le contexte du réchauffement climatique de la planète actuellement en cours (0,6 (0.2°C depuis le début du 20^{ème} siècle, IPCC, 2001), les hautes latitudes de l'hémisphère nord se réchauffent plus rapidement que les autres régions : les tendances observées atteignent 1°C par décennie sur la période 1976-2000 sur une partie de la Sibérie, le nord du Canada et l'Alaska. Cette tendance marquée sur les surfaces continentales s'explique en partie par un recul de la couverture neigeuse observée, que les modèles utilisés pour le 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC ne reproduisent que partiellement (Roesch, 2006). Un réchauffement s'était également produit à l'échelle de l'hémisphère nord à partir du début des années 1920 ; à son maximum, sur la période 1930-1949, il atteignait 0,5°C en moyenne globale, mais dans le même temps l'Arctique s'était alors réchauffé de 1,7°C, ce qui a été interprété notamment par des rétroactions climatiques mettant en jeu la glace de mer (Bengtsson et al., 2004). En revanche, à l'exception de la Péninsule Antarctique, cette amplification du réchauffement climatique n'a pas été observée en Antarctique au cours du 20^{ème} siècle. ▶

Les projections climatiques réalisées sur le 21^{ème} siècle (IPCC, 2001) indiquent également une amplification du réchauffement climatique sur l'Arctique par rapport à la tendance en moyenne globale,

Des simulations de doublement du taux de CO₂ atmosphérique réalisées dans le cadre de l'exercice d'intercomparaison de modèles CMIP2 ont montré que le réchauffement en Arctique était de 1,5 à 4,5 fois plus intense qu'en moyenne globale (Holland and Bitz, 2003). Si cette amplification est essentiellement due à une boucle de rétroaction impliquant l'albédo de la banquise, sa dispersion selon les modèles semble essentiellement due à l'état initial de la couverture de banquise arctique, aux réponses diverses des nuages, tandis que les neiges et glaces continentales jouent un rôle de second ordre. Par ailleurs, des simulations paléo-climatiques du dernier maximum glaciaire (DMG, il y a 21000 ans) réalisées dans le cadre de PMIP2 indiquent également que le réchauffement entre le DMG et le climat préindustriel est amplifié dans les régions polaires par rapport à la moyenne globale de ce réchauffement (Masson-Delmotte et al., 2006), et qu'il existe une corrélation forte entre la température simulée dans les régions polaires et la température moyenne du globe, confirmant que les données issues de carottes de glace constituent de bons indicateurs de certaines variations climatiques globales.

Couplages climatiques mettant en jeu la glace de mer

Les couvertures de banquise des deux hémisphères présentent une variabilité interannuelle importante, en réponse aux forçages océaniques et atmosphériques. Si en Antarctique, aucune tendance nette de la surface englacée n'est actuellement décelable, en Arctique, sur la période 1972-2002, l'extension de glace de mer arctique en moyenne annuelle s'est réduite de 0,9.106 km² (Cavalieri et al., 2003), et ce retrait s'est accéléré depuis la fin des années 1990, en particulier l'été (Stroeve et al., 2005). Des boucles de rétroaction positive mettant en jeu la glace de mer ont été mises en évidence, à la fois par l'observation et la modélisation. Par exemple, pendant l'été, les parcelles d'eau libre au sein du pack de banquise (chenaux) ont un faible albédo, absorbent une fraction importante du rayonnement solaire incident, et donc se réchauffent. Cela augmente la fonte latérale des plaques de banquise, conduisant à une augmentation de l'absorption de rayonnement solaire par la surface marine (Maykut and Perovich, 1987). Curry et al. (1995) ont documenté d'autres boucles de rétroaction positive mettant en jeu l'albédo de la glace. Ce dernier dépend de l'épaisseur du bloc considéré, des déformations qu'il a subies, et de la nature de sa surface (couverture de neige, présence de mares de fonte...). Il est souligné dans cette étude que la simulation de la banquise ne peut être validée uniquement par comparaison des épaisseurs modélisées et observées sur la fin du 20^{ème} siècle : il faut également s'assurer que la sensibilité de l'épaisseur modélisée de la banquise aux forçages climatiques est correcte, surtout en vue de réaliser des projections sur le 21^{ème} siècle. Par ailleurs, de nombreux travaux ont suggéré des boucles de rétroaction mettant en jeu des interactions Arctique/Atlantique Nord (e.g. Goosse et al., 2002 ; Goosse and Holland, 2005).

Couplages climatiques impliquant les calottes glaciaires et les glaciers

Des observations altimétriques ont montré que le niveau moyen des océans a augmenté de 37mm sur la période 1993-2005 (Nerem et al., 2006), dont 40% de cette variation s'explique par la fonte des glaciers et des calottes glaciaires. Une étude récente montre que l'écoulement des grands glaciers drainant la calotte groenlandaise s'accélère, ce qui suggère que les projections futures de la remontée du niveau des mers sont vraisemblablement sous-estimées (Rignot and Kanagaratnam, 2006). De plus, d'autres études basées à la fois sur des résultats de modélisation et sur des observations altimétriques (Krabill et al., 2004) révèlent une perte de masse importante survenue au cours de la dernière décennie (Schutz et al., 2005; Zwally et al., 2005). Cet afflux d'eau supplémentaire vers l'océan pourrait réduire la convection océanique profonde en mer du Labrador, avec pour conséquence l'affaiblissement de la circulation thermohaline.

Cryosphère et circulation thermohaline : projections pour le 21^{ème} siècle

Cette partie donne un rapide aperçu de la modélisation de l'état actuel des différentes composantes de la cryosphère et de leurs évolutions respectives au cours du 21^{ème} siècle par les modèles climatiques utilisés pour le 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC.

Evolution de la couverture de glace de mer

Sur les 20 modèles de banquise utilisés dans le cadre des récentes simulations réalisées pour le GIEC, 11 comportent une discrétisation verticale des plaques de glace, 7 prennent en compte des catégories d'épaisseurs et 17 utilisent une dynamique de glace avancée, ce qui représente un net progrès en modélisation de banquise par rapport au précédent rapport du GIEC (IPCC, 2001). Tout en gardant à l'esprit que la simulation de la banquise dépend fortement des forçages atmosphériques et océaniques, ces progrès sont visibles à l'examen des étendues de glace simulées sur la période 1981-2000 par les différents modèles, même si les écarts aux observations restent parfois importants en Antarctique (Arzel et al., 2006a). En revanche, bien que l'on dispose de relativement peu d'observations, il est très probable que l'épaisseur de la banquise sur la même période ne soit généralement pas correctement simulée (répartition géographique et épaisseur moyenne). Par conséquent, si de nombreux modèles simulent un Océan Arctique libre de glaces à la fin de l'été pour la fin du 21^{ème} siècle (Arzel et al., 2006a), la date à laquelle ce phénomène pourrait se produire pour la première fois reste très incertaine. Enfin, les modèles semblent s'accorder sur le fait qu'en Arctique, le volume moyen annuel de la banquise devrait décroître deux fois plus rapidement que sa surface (**Table 1**). ▶

	Arctique			Antarctique		
	Mars	Septembre	AM	Mars	Septembre	MA
Étendue de glace	-15.4	-61.7	-27.7	-49	-19.1	-24
Volume de glace	-47.8	-78.9	-58.8	-58.1	-27.4	-33.7

Une fonte de banquise initiée par un réchauffement anthropique peut entraîner un changement de régime climatique, comme cela est observé dans la simulation SRES-A1B utilisant IPSL-CM4, où le débit au détroit de Fram, qui est une source importante d'eau douce pour le nord de l'Atlantique Nord, subit une rapide transition d'un état faible vers un état relativement fort durant 1990-2010 (figure 1). Arzel et al. (2006b) proposent qu'une rétroaction positive du système océan-glace de mer-atmosphère dans le secteur des mers de Groenland-Islande-Norvège (GIN)-Barents serait responsable de cette évolution. Ce processus est initié par le retrait de la glace dans la mer de Barents en réponse au réchauffement du climat de l'Arctique durant la fin du 20^{ème} siècle. Vers l'année 2080, le modèle présente une seconde transition à l'issue de laquelle le débit au détroit de Fram retrouve sa faible valeur initiale. Une lente désalinisation des mers de GIN est invoquée pour expliquer cette transition.

Table 1 : Moyenne multi-modèles des changements relatifs d'étendue et de volume de glace de mer entre les périodes 2081-2100 et 1981-2000 pour les mois de mars, septembre, et en moyenne annuelle (MA) dans les deux hémisphères.

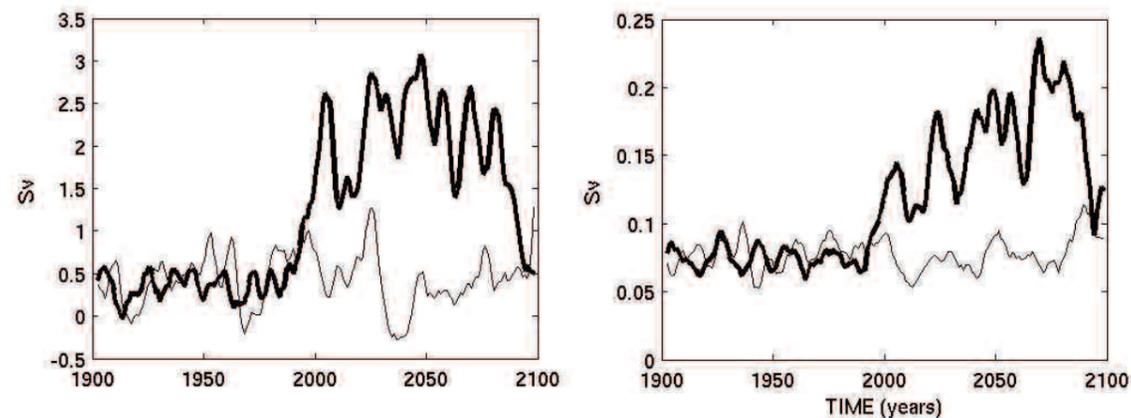


Figure 1 : Séries temporelles du transport océanique (gauche) et de l'export d'eau douce liquide (droite) au détroit de Fram, modélisés par IPSL-CM4, en Sverdrups (Sv, 1Sv=106m3/s). Une moyenne glissante de 5 ans a été appliquée. Les traits fins et épais représentent respectivement les séries temporelles associées à une expérience préindustrielle (contrôle), et à une simulation du 20ème siècle suivie d'un scénario SRES-A1B sur le 21^{ème} siècle.

Evolution des bilans de masse des calottes glaciaires et des glaciers

L'évolution du bilan de masse de la calotte glaciaire antarctique et de son impact sur le niveau des océans a été estimée pour la fin du 21^{ème} siècle en régionalisant des simulations climatiques réalisées avec le modèle IPSL-CM4 au moyen de la version zoomée à 60km de résolution de LMDZ. Une simulation utilisant directement les conditions aux limites océaniques fournies par IPSL-CM4 pour

l'époque actuelle (1981-2000) et la fin du 21^{ème} siècle (2081-2100) indique que le bilan de masse annuel de la calotte Antarctique augmenterait de 32 mm au cours du 21^{ème} siècle (figure 2), ce qui équivaut à une diminution du niveau de la mer de 1,2mm/an (Krinner et al., 2006a). Dans le cas d'une simulation où des anomalies

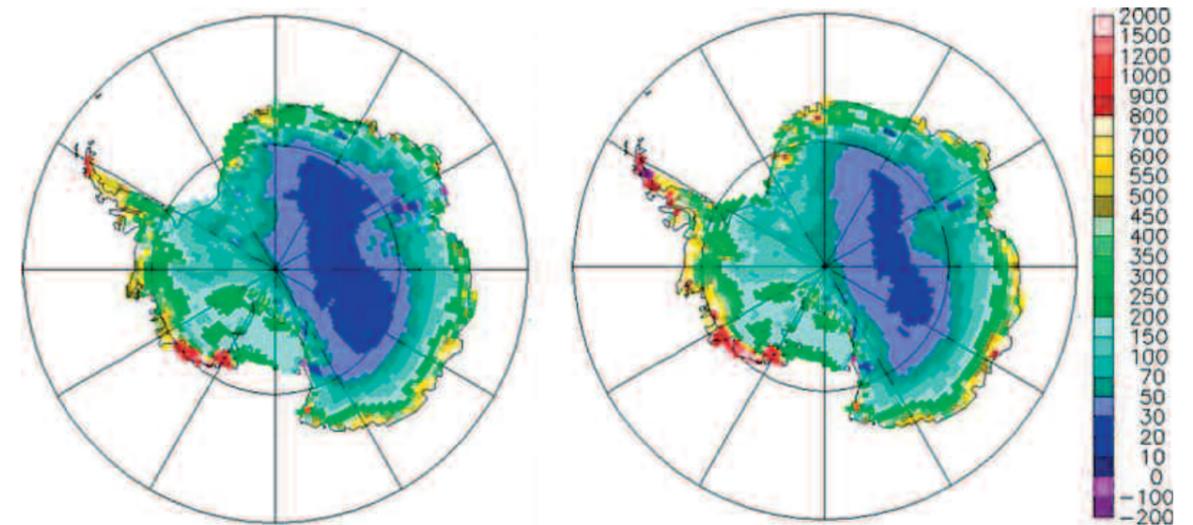


Figure 2 : Bilans de masse en surface simulés pour la calotte glaciaire Antarctique (kg/m2/an) : 1981-2000 (gauche) et 2081-2100 (droite), dans le cas d'un scénario SRES-A1B.

de conditions aux limites fournies par IPSL-CM4 sont ajoutées à la climatologie de l'époque actuelle, les deux chiffres précédents s'établissent respectivement à 43mm/an d'augmentation de bilan de masse et 1,5mm/an de diminution du niveau des océans (Krinner et al., 2006b). Dans les deux cas, l'évolution du bilan de masse s'explique essentiellement par une augmentation des précipitations, la fonte de neige en surface évoluant peu. L'augmentation des températures dans la région de l'Antarctique permet une augmentation du contenu en eau de l'air, et une convergence d'humidité accrue au-dessus du continent. Cependant, à l'échelle régionale, en particulier près des côtes, des changements de dynamique atmosphérique modulent cet effet. Enfin, un autre travail en cours, suivant la même méthodologie (G. Krinner, communication personnelle), indique qu'au contraire la fonte de la calotte groenlandaise devrait s'intensifier au cours du 21^{ème} siècle.

Ainsi, le bilan global des changements de bilan de masse des deux calottes pourraient se traduire par une légère augmentation annuelle du niveau des océans.

Un modèle permettant de simuler le bilan de masse du glacier de St Sorlin (Alpes Françaises) a été mis en place (Gerbaux, 2005) et validé sur la période 1981-2004 à partir d'observations in situ. L'utilisation de données d'anomalies de forçage provenant de plusieurs modèles du 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC suivant le scénario SRES-B1 indique que ce glacier devrait fondre rapidement au cours du 21^{ème} siècle, avant de disparaître complètement vers 2070. ▶

Évolution de la convection océanique en Atlantique Nord et circulation thermohaline

Au cours du 21^{ème} siècle, les simulations suivant le scénario SRES-A1B réalisées par différents modèles, indiquent que la circulation thermohaline en Atlantique Nord devrait s'affaiblir de 0 à 50% (Schmittner et al., 2005). Aucune simulation n'indique de diminution soudaine de cette circulation, une conclusion partagée par Gregory et al. (2005) à l'issue d'une analyse d'expériences d'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique de 1% par an jusqu'au quadruplement (4x CO₂). Cette dernière étude précise également que l'évolution de la circulation thermohaline est surtout conditionnée par des changements de flux de chaleur affectant la surface océanique plutôt que par des changements de flux d'eau. Cependant, les modèles utilisés négligent la contribution de la fonte du Groenland aux changements de flux d'eau.

Or, dans le cas d'une expérience 4x CO₂ réalisée avec le modèle IPSL-CM4, au moment du quadruplement de la concentration de CO₂, l'intensité de la circulation thermohaline a décliné de 21%, contre 47% en prenant en compte le flux d'eau lié à la fonte de la calotte groenlandaise (Swingedouw et al., 2006).

Dans ce dernier cas, les températures de surface simulées sont jusqu'à 5°C plus froides près de la mer de Kara que dans la simulation où la fonte des glaces continentales n'est pas prise en compte.

Au cours de l'expérience simulant le 20^{ème} siècle réalisée avec le modèle CNRM-CM3, l'intensité de la circulation thermohaline se réduit de 8%. Cette diminution peut s'expliquer par une désalinisation importante des mers du Labrador et d'Irminger entraînant un affaiblissement de la convection océanique profonde dans ces régions. L'origine de ce changement de caractéristiques de masses d'eau dans les deux mers est similaire à celle de la "Grande Anomalie de Sel". On assiste à une fonte significative de la glace de mer conduisant à des eaux de surface devenant plus douces dans les régions polaires. Ces eaux sont advectées par le détroit du Danemark et envahissent la Mer d'Irminger et du Labrador. Ce transport est assuré par le courant moyen mais aussi favorisé par les anomalies de circulation atmosphérique de surface et courants océaniques de surface associés. Au cours du 21^{ème} siècle, l'intensité de la circulation thermohaline dans les différents scénarios diminue en moyenne d'environ 40%.

Ce phénomène s'explique par une rétroaction positive du système océan-glace-atmosphère, induisant un renforcement des interactions entre l'Arctique et l'Atlantique Nord. Cela se traduit notamment par une intensification du courant Est-Groenlandais et du courant de Norvège (Guemas and Salas-Mélia, 2006).

Références

- Arzel, O., T. Fichefet and H. Goosse, 2006a** : Sea ice evolution over the 20th and 21st centuries as simulated by current AOGCMs. *Ocean Modelling*, 12, 401-415. doi: 10.1016/j.ocemod.2005.08.002
- Arzel, O., T. Fichefet, H. Goosse and J.-L. Dufresne, 2006b** : Causes and impacts of Arctic freshwater budget changes over the 20th and 21st centuries in an AOGCM. *Clim. Dyn.*, submitted.
- Bengtsson, L., V.A. Semenov and O.M. Johannessen, 2004** : The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic - a Possible Mechanism. *J. Clim.*, 17, 4045-4057.
- Cavaleri, D.J., C.L. Parkinson and K.Y. Vinnikov, 2003** : 30-year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (18). doi :10.1029/2003GL018931.
- Curry, J.A., J.L. Schramm and E.E. Ebert, 1995** : Sea Ice-Albedo Climate Feedback Mechanism. *J. Clim.* 8, 240-247.
- Gerbaux, M., 2005** : Reconstruction du bilan de masse des glaciers alpins et impact d'un changement climatique (in French). PhD, J. Fourier University, Grenoble, France, 132pp. <http://lgge.obs.ujf-grenoble.fr/publicscience/theses/these-gerbaux.pdf>.
- Goosse H., F.M. Sellen, R. J. Haarsma and J.D. Opsteegh, 2002**. A mechanism of decadal variability of the sea-ice volume in the Northern Hemisphere. *Climate Dynamics* 19, 61-83, DOI: 10.1007/s00382-001-0209-5
- Goosse, H. and M. Holland, 2005** : Mechanisms of decadal and interdecadal Arctic variability in the Community Climate System Model CCSM2. *J. Clim.* 18, 3552-3570.
- J.M. Gregory, K.W. Dixon, R.J. Stouffer, A.J. Weaver, E. Driesschaert, M. Eby, T. Fichefet, H. Hasumi, A. Hu, J.H. Jungclaus, I.V. Kamenkovich, A. Levermann, M. Montoya, S. Murakami, S. Nawrath, A. Oka, A.P. Sokolov and R.B. Thorpe, 2005** : A model intercomparison of changes in the Atlantic thermohaline circulation in response to increasing atmospheric CO₂ concentration. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12703, doi:10.1029/2005GL023209.
- Guemas, V. and D. Salas-Mélia, 2006** : Variability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation in an Atmosphere-Ocean Global Coupled Model. *Ocean Modelling*, submitted.
- Holland, M.M. and C.M. Bitz, 2003** : Polar amplification in climate changes in coupled models. *Clim. Dyn.* 21, 221-232.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001**. *Climate Change 2001* (J.T. Houghton et al., Eds.), Cambridge Univ. Press, New York.
- Krabill, W., et al., 2004** : Greenland ice sheet: increased coastal thinning. *Geophys. Res. Lett.*, 31(L24402) : doi :10.1029/2004GL021533.
- Krinner, G., O. Magand, I. Simmonds, C. Genthon and J. L. Dufresne, 2006** : Simulated Antarctic precipitation and surface mass balance at the end of the 20th and 21st centuries. *Clim. Dyn.* doi:10.1007/s00382-006-0177-x.
- Krinner, G., B. Guicherd, K. Ox and C. Genthon, 2006** : Simulations of Antarctic climate and surface mass balance change from 1981-2000 to 2081-2100. *J. Clim.*, submitted.
- Masson-Delmotte, V., M. Kageyama, P. Braconnot, S. Charbit, G. Krinner, C. Ritz, E. Guilyardi, J. Jouzel, A. Abe-Ouchi, M. Crucifix, R. M. Gladstone, C. D. Hewitt, A. Kitoh, A. N. LeGrande, O. Marti, U. Merkel, T. Motoi, R. Ohgaito, B. Otto-Bliesner, W. R. Peltier, I. Ross, P. J. Valdes, G. Vettoretti, S. L. Weber, F. Wolk and Y. Yu, 2006** : Past and future polar amplification of climate change: climate model intercomparisons and ice-core constraints. *Clim. Dyn.* 26, 513-529. doi: 10.1007/s00382-005-0081-9
- Maykut, G. and D.K. Perovich, 1987** : The role of shortwave radiation in the summer decay of a sea ice cover. *J. Geophys. Res.* 92, C7, 7032-7044.
- Nerem, R.S., E. Leuliette and A. Cazenave, 2006** : Present-day sea level change, *C.R. Geosciences*. doi:10.1016/j.crte.2006.09.001.
- Rignot, E. and P. Kanagaratnam, 2006** : Changes in the velocity structure of the Greenland ice sheet. *Science*, 311, 986-990.
- Roesch, A., 2006** : Evaluation of surface albedo and snow cover in AR4 coupled climate models. *J. Geophys. Res.* 111, D15111, doi: 10.1029/2005JD006473.
- Schmittner, A., M. Latif and B. Schneider, 2005** : Model projections of the North Atlantic thermohaline circulation for the 21st century assessed by observations. *Geophys. Res. Lett.* 32, L23710, doi:10.1029/2005GL024368.
- Schutz, B.E., H.J. Zwally, C.A. Shuman, D. Hancock and J.P. DiMarzio, 2005** : Overview of the ICESat Mission. *Geophys. Res. Lett.*, 32(L21S01), doi :10.1029/2005GL024009.
- Stroeve, J. C., M. C. Serreze, F. Fetterer, T. Arbetter, W. Meier, J. Maslanik, and K. Knowles, 2005** : Tracking the Arctic's shrinking ice cover: Another extreme September minimum in 2004. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L04501, doi :10.1029/2004GL021810.
- Swingedouw, D., P. Braconnot and O. Marti, 2006** : Sensitivity of the Atlantic Meridional Overturning Circulation to the melting from northern glaciers in climate change experiments. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L07711, doi:10.1029/2006GL025765.
- Zwally, H.J., M.B. Giovinetto, J. Lun, H.G. Cornejo, M.A. Beckley, A.C. Brenner, J.L. Saba and D. Yi, 2005** : Mass changes of the Greenland and Antarctic ice sheets and shelves and contributions to sea-level rise: 1992-2002. *Journal of Glaciology*, 51(175), 509-527.