

## TRANSPORT DE LA NEIGE PAR LE VENT EN TERRE ADÉLIE (ANTARCTIQUE). OBSERVATION ET MODÉLISATION AVEC LE MODÈLE ATMOSPHÉRIQUE RÉGIONAL (MAR)

Hubert GALLÉE<sup>1</sup>, Alexandre TROUVILLIEZ<sup>1,2</sup>, Cécile AGOSTA<sup>1</sup>, Christophe GENTHON<sup>1</sup>, Vincent FAVIER<sup>1</sup> et Florence NAAIM-BOUVET<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> IRSTEA, Domaine universitaire, 2, rue de la Papeterie, 38402 Saint-Martin d'Hères, France

**Résumé :** Le modèle climatique à aire limitée MAR a été utilisé pour simuler la détection du transport de neige par le vent en Terre Adélie, Antarctique, sur un petit domaine (500 x 500 km<sup>2</sup>) et une résolution horizontale fine (5 km). Le mois de janvier 2010 est simulé et l'accord avec l'observation est excellent, comme en témoignent les tests statistiques appliqués aux résultats. Même si MAR sous-estime légèrement la détection des événements de transport, la mise en œuvre du modèle sur tout l'Antarctique à 40 km de résolution met en évidence une contribution du processus de transport au bilan de masse en surface bien plus importante qu'estimée auparavant.

**Mots-clés :** Modélisation climatique, Antarctique, transport de la neige par le vent, couvert neigeux.

**Abstract:** Transport of snow by the wind in Adélie Land (Antarctica). Observation and modeling by the Modèle Atmosphérique Régional (MAR).

The regional climate model MAR has been used to simulate transport of snow by the wind in Adélie Land, Antarctica, over a small domain (500 x 500 km<sup>2</sup>) and with a fine horizontal resolution (5 km). Simulation of January 2010 is performed and the agreement with the observation is excellent, as it is inferred from statistical tests. Even if slightly underestimates detection of snow transport events, the set-up of the model over the whole antarctic ice sheet with an horizontal resolution of 40 km exhibits a contribution of the transport to the surface mass balance which is much larger than previously estimated.

**Keywords:** Climate Modeling, Antarctica, Snow Transport by the Wind, Snow pack.

### Introduction

Le bilan de masse en surface de l'Antarctique se définit comme la somme des précipitations moins l'érosion de la neige en surface et sa sublimation, et l'écoulement de l'eau de fonte. Sa contribution à l'élévation du niveau moyen des mers est probablement la composante la moins bien connue de celui-ci et est probablement non négligeable (Solomon *et al.*, 2007).

Parmi les composantes du bilan de masse en surface de la calotte glaciaire antarctique l'érosion de la neige par le vent peut être responsable de la redistribution et/ou de la sublimation de 35 % de la précipitation en région côtière (Bromwich, 1988). Or c'est dans cette zone de plus faible altitude que la calotte de glace est la plus sensible au changement climatique. Ce grand rôle potentiel de l'érosion de la neige par le vent en bas des pentes de la calotte glaciaire trouve ses causes dans les vents violents qui y soufflent, dépassant parfois 300 km/heure. C'est dans cette région d'ailleurs que les vents moyens au niveau de la mer sont les plus forts au monde (Parish, 1988).

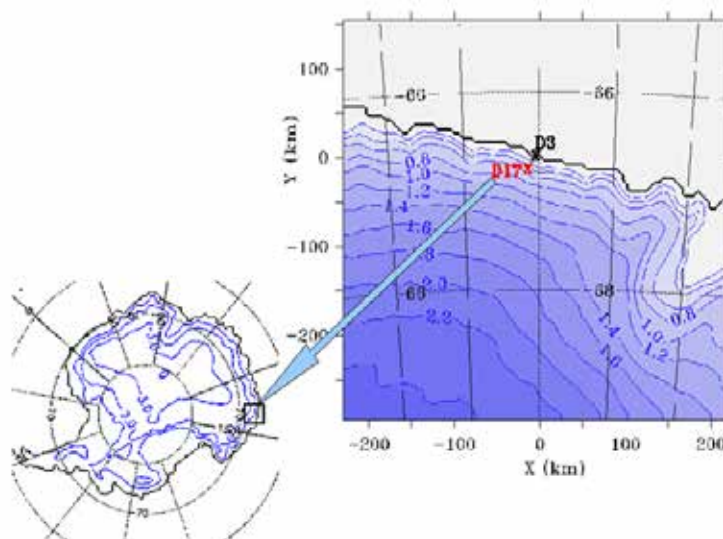
L'érosion de la neige et son transport par le vent sont un phénomène complexe faisant intervenir une multitude de processus physiques, comme la résistance de la neige à l'érosion, la modulation du paysage par celle-ci, avec un changement de la rugosité de surface qui intervient en retour sur le comportement des processus turbulents et du transport, et finalement sur l'érosion. De plus, la forte variation selon la verticale de la densité du mélange air - neige aéro-transportée module l'intensité de la turbulence.

Sur les terrains inclinés enfin, la forte variation verticale de la densité de l'air induite par la présence de neige aéro-transportée et le refroidissement de l'air dû à la sublimation accentue la force du gradient de pression dans le sens de la pente, favorisant les vents descendants le long des pentes (vents catabatiques ; cf. Gallée, 1998).

En vue d'étudier l'érosion et le transport de la neige par le vent en Antarctique le LGGE a déployé depuis 2009 en Terre Adélie un réseau de mesures à la fois météorologiques et nivologiques. Il faut d'ailleurs noter que c'est la première fois qu'un tel réseau de mesures est mis en œuvre sur une aussi longue période. La Terre Adélie est un endroit privilégié pour beaucoup de raisons : la neige est présente au sol en permanence, les vents forts y sont fréquents, avec une constance remarquable dans leur direction. Le terrain est peu accidenté même s'il est en pente, ce qui favorise une structure relativement simple de l'écoulement de l'air aux petites échelles (de l'ordre de quelques km). La météorologie est bien documentée et les analyses météorologiques y sont bien contraintes par les sondages aérologiques effectués à la base de Dumont-d'Urville, située sur une île à 5 km de la côte. Finalement, la logistique y est de grande qualité, ce qui est un atout pour une terre aussi éloignée et inhospitalière que l'Antarctique.

Nous proposons dans cet article de valider la représentation de l'érosion et du transport de la neige par le vent dans un modèle météorologique à aire limitée dont la première vocation est l'étude des régions polaires. Pour ce faire le modèle sera mis en œuvre sur un domaine relativement petit comprenant la zone de mesures (environ 500 x 500 km, figure 1) avec un maillage fin (5 km) et sur une longue période de temps. L'objectif n'est pas ici de simuler une climatologie, mais bien de générer un champ de vent suffisamment correct pour pouvoir valider la simulation des événements de transport.

**Figure 1 :** Localisation et topographie du domaine choisi pour l'étude de validation (terre Adélie). Espacement entre les lignes de niveau : 0,2 km. Pour l'étude de sensibilité, tout le domaine antarctique est retenu.



Dans ce qui suit, le modèle et sa mise en œuvre seront décrits un peu plus en détails. Nous discuterons ensuite son comportement et finalement nous l'appliquerons à tout l'Antarctique, en vue de déterminer la sensibilité du bilan de masse en surface de l'Antarctique au phénomène de transport.

## 1. MAR

MAR a d'abord été développé en Belgique dans le cadre du programme antarctique belge (Gallée et Schayes, 1994). Il continue à être développé à Grenoble (collaboration LGGE – LJK). MAR est un modèle utilisant les équations de Navier-Stokes dans lesquelles sont faites

l'approximation des fluides parfaits (on néglige la viscosité de l'air) et l'approximation hydrostatique, cette dernière étant acceptable en Antarctique vu les accélérations verticales très faibles qui y sont observées.

Les paramétrisations sous-mailles comportent un modèle de rayonnement, un modèle de microphysique nuageuse pronostique (Gallée, 1995), un modèle de la turbulence atmosphérique développé à partir des travaux de Duynkerke (1988) et Bintanja (2000) et comprenant deux équations pronostiques, sur l'énergie cinétique turbulente et sa dissipation. Un modèle de flux de masse décrivant la convection atmosphérique est également branché pour pouvoir tenir compte des phénomènes convectifs loin au-dessus de l'océan.

MAR a été couplé à un modèle de neige (Gallée et Duynkerke, 1996) dans lequel ont été introduites 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 turbulence – neige aéro-transportée (Gallée *et al.*, 2001). Plusieurs validations de la météorologie de la Terre Adélie dans MAR ont déjà effectuées (Gallée *et al.*, 1996 ; Gallée et Pettré, 1998). L'influence du transport de la neige par le vent sur le bilan de masse en surface de la Terre de Wilkes (bordant la Terre Adélie par l'ouest) a également été étudiée (Gallée *et al.*, 2005).

## 2. Validation du module de transport de la neige par le vent sur la Terre Adélie

MAR a été mis en œuvre sur le domaine de la Terre Adélie dans les analyses ERA-Interim pour la période allant de début décembre 2009 à fin janvier 2010. Une seule initialisation est faite et le modèle ne présente pas de dérive dans le temps. La simulation du mois de décembre permet au modèle d'atteindre un équilibre acceptable avec les conditions de forçage. Il faut noter que cette mise en équilibre est rapide, vu les nombreux événements de précipitation et d'érosion de la neige qui influencent le manteau neigeux. Seul le vent simulé durant le mois de janvier 2010 est analysé ici. Plus de détails, tant sur les observations que la simulation, peuvent être trouvés dans Gallée *et al.* (2012).

Les données d'observation et de simulation sont utilisées avec une résolution temporelle d'une demi-heure. Les résultats sont exposés dans le tableau 1. Ils montrent un excellent accord entre le vent simulé et le vent observé. La validation de la simulation des événements de transport est dès lors possible.

**Tableau 1** : Performances du MAR en Terre Adélie en janvier 2010, pour le vent à D3 et D17.

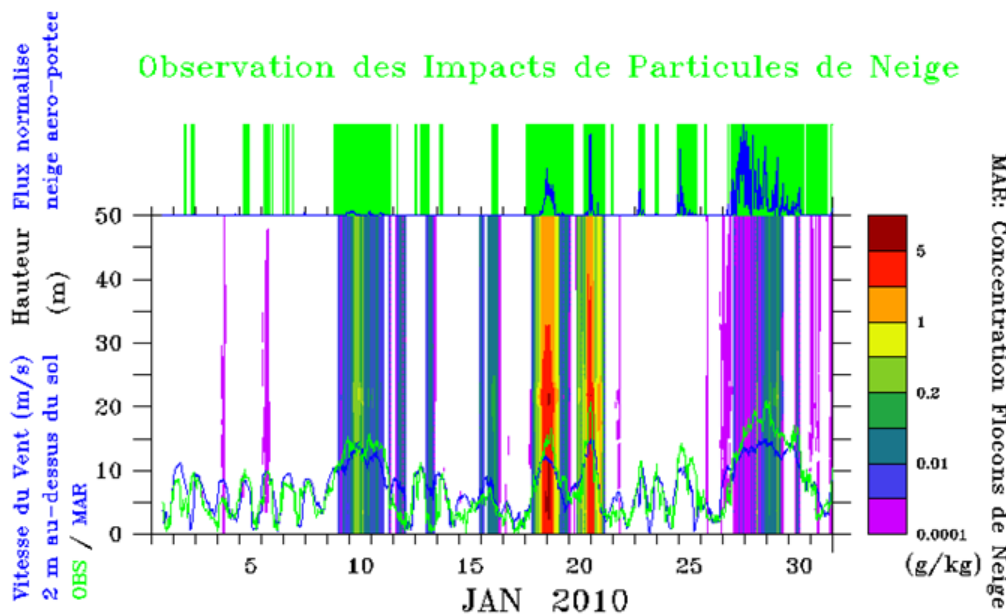
	<b>D3</b>	<b>D17</b>
<b>Corrélation</b>	0,84	0,86
<b>Test de Nash</b>	0,69	0,72

Plus de détails, tant sur les observations que la simulation, peuvent être trouvés dans Gallée *et al.* (2012).

La comparaison entre l'observation et la simulation des événements de neige aéro-transportée est montrée sur la figure 2. Les données d'observation ne permettent que de détecter le début et la fin des événements de transport, car les appareils utilisés (détecteurs acoustiques) durant cette période ne peuvent être calibrés pour estimer les flux observés (Cierco *et al.*, 2007). Le modèle est donc validé sur sa capacité à reproduire ou non les événements de transport.

La figure 2 montre ainsi plusieurs événements de neige aéro-transportée, à la fois simulés et observés. Elle montre également la comparaison entre observation et simulation du vent 2 mètres au-dessus de la surface, qui illustre une nouvelle fois l'excellent comportement de cette variable dans MAR.

Des évènements de transport simulés significatifs (concentration en neige aéroportée supérieure à  $0,2 \text{ g kg}^{-1}$ ) ont lieu les 10, 18-19, 20-21 et 28 janvier. Ces évènements correspondent à des épisodes de vent fort et sont observés. Des précipitations neigeuses sont également observées durant les 3 premiers évènements. MAR est moins bon après le 21 janvier. Cela est lié à un radoucissement, entraînant de la fonte en surface. Bien plus, les observateurs ont noté qu'une croûte de regel s'est ensuite formée et qu'il n'y a plus eu de précipitations avant la fin du mois. Par contre, le vent a transporté progressivement de la neige à partir des zones plus élevées de la calotte. Le mauvais comportement du MAR peut alors s'expliquer par l'interdiction qui y est faite d'éroder de la neige ayant subi de la fonte. Finalement l'évènement de transport simulé par MAR après le 25 s'explique par la capacité du modèle à reproduire le transport observé à partir de la région intérieure de la calotte glaciaire, quoique plus tard et en le sous-estimant.

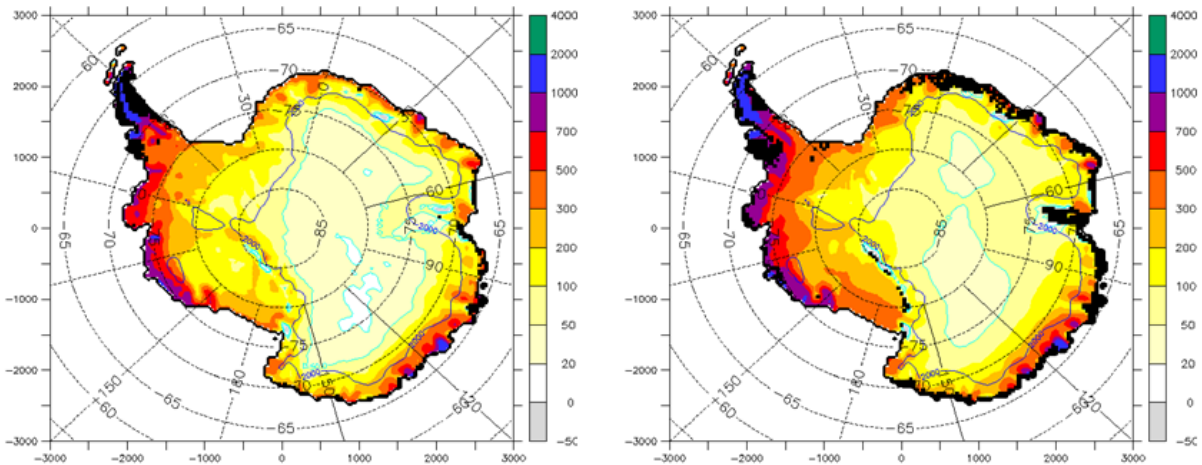


**Figure 2 :** Principaux paramètres caractérisant le transport de la neige par le vent à D3, Terre Adélie. Comparaison observation – simulation pour le vent 2 m au-dessus de la surface (respectivement les courbes verte et bleue – noire et grise en dégradé de gris, cf. échelle en bas à gauche) et les évènements de transport : observation des évènements : barres verticales vertes (grises) en haut (seuil de détection :  $0,0001 \text{ g m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ ) ; les intensités des flux sont superposées en bleu – noir – et sont qualitatives et purement indicatives ; simulation de la concentration en neige aéroportée sur les 50 premiers mètres au-dessus de la surface (échelle à droite).

### 3. Importance du transport de la neige par le vent dans bilan de masse en surface de l'Antarctique

Pour étudier cette contribution, MAR est mis en œuvre sur tout l'Antarctique dans les analyses ERA-Interim, pour la période allant de 2003 à 2007, et avec une résolution horizontale de 40 km. La comparaison entre les deux simulations à partir des deux panneaux de la figure 3 montre une diminution importante du bilan de masse en surface lorsque le modèle de transport de neige par le vent est branché. Le bilan de masse en surface moyen pour la partie de la calotte de glace reposant sur le socle rocheux s'élève respectivement à 154 et 188 mm en équivalent eau avec et sans transport de neige par le vent.

On remarque également une diminution substantielle de l'écoulement lorsque le module de transport de neige par le vent est branché. En effet l'apport de neige à grains fins en cas de transport est responsable d'une augmentation de l'albédo, ce qui atténue la fonte.



**Figure 3** : Bilan de masse en surface de la calotte glaciaire antarctique ; moyenne pour les années 2003-2007. Sensibilité du bilan de masse en surface simulé MAR à l'activation du module de transport de neige par le vent (panneau de gauche) ou non (panneau de droite). Les échelles de couleur sont en mm d'eau équivalent par an. Les pixels en noir indiquent où l'écoulement de l'eau de fonte est supérieur à 3 mm d'eau équivalent par an.

## Conclusion

MAR a été utilisé pour simuler le transport de la neige par le vent en Antarctique. Une validation est d'abord effectuée à partir d'une campagne de mesures ayant eu lieu durant tout le mois de janvier 2010 et sur un petit domaine à fine résolution comprenant le site de la campagne d'observations. Les résultats montrent l'excellent comportement du modèle, même si celui-ci a tendance à sous-estimer légèrement le nombre et la durée des événements. D'autre part, c'est la première fois qu'est effectuée une validation du transport de neige par le vent simulé par un modèle météorologique et sur une aussi longue période de temps. Elle ouvre de ce fait la voie à la représentation de ce processus dans les simulations climatiques.

MAR est ensuite mis en œuvre sur tout l'Antarctique et ce sur une durée de 5 ans (2003-2007). La sensibilité du modèle à l'activation ou non du module de transport de neige par le vent est importante (entre 15 et 20 % du bilan de masse en surface). Cette sensibilité est deux à trois fois plus importante qu'estimée auparavant, ce qui est une surprise. Vu que MAR a tendance à sous-estimer le transport de la neige par le vent, il faut s'attendre à ce le rôle de ce processus soit en réalité plus important encore.

**Remerciement** : Nous remercions le projet ICE2SEA, financé par le 7<sup>ème</sup> programme cadre de la communauté européenne (financement 226375). Contribution ICE2SEA n°086. Les simulations MAR ont été effectuées au CNRS/IDRIS et sur les calculateurs CIMENT de l'Université Joseph Fourier. Les mesures de terrain ont été obtenues avec le soutien de l'institut polaire français IPEV (programme CALVA 1013).

## Références bibliographiques

- Bintanja R., 2000 : Snowdrift suspension and atmospheric turbulence'. Part I: Theoretical background and model description. *Boundary-Layer Meteorol.*, 95, 343-368.
- Bromwich D. H., 1988 : Snowfall in High Southern Latitudes. *Rev. Geophys.*, 26, 149-168.
- Cierco F.-X., Naaim-Bouvet F. et Bellot H., 2007 : Acoustic sensors for snowdrift measurements: How should they be used for research purposes? *Cold Regions Science and Technology*, 49, 74-89.
- Duynkerke P. G., 1988 : Application of the  $E-\epsilon$  closure model to the neutral and stable boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 45, 865-880.

- Gallée H. et G. Schayes, 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., 1995 : Simulation of the mesocyclonic activity in the Ross Sea, Antarctica. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 2051-2069.
- Gallée H. et Duyenkerke P. G., 1996 : Air-Snow Interactions and the Surface Energy and Mass Balance over the Melting Zone of West Greenland during GIMEX. *Journal of Geophysical Research*, 102, 13813-13824.
- Gallée H., P. Pettré et G. Schayes, 1996 : Sudden cessation of katabatic winds in Adélie Land. *Antarctica. J. Appl. Meteorol.*, 35, 1142-1152.
- Gallée H. et P. Pettré, 1998 : Dynamical constraints on katabatic wind cessation in Adélie Land. *Antarctica. J. Atmos. Sci.*, 55, 1755-1770.
- Gallée H., 1998 : A simulation of blowing Snow over the Antarctic Ice Sheet. *Ann. Glaciol.*, 26, 203-205.
- Gallée H., Guyomarc'h G. et E. Brun, 2001 : Impact of Snow Drift on the Antarctic Ice Sheet Surface Mass Balance. Possible Sensitivity to Snow Surface Properties. *Boundary-Layer Meteorol.*, 99, 1-19.
- Gallée H., Peyaud V. et I. Goodwin, 2005 : Simulation of the net snow accumulation along the Wilkes Land transect, Antarctica, with a regional climate model. *Ann. Glaciol.*, 41, 17-22.
- Gallée H., A. Trouvilliez, C. Agosta, C. Genthon, V. Favier et F. Naaim-Bouvet, 2012 : Transport of snow by the wind: a comparison between observations made in Adélie Land, Antarctica, and simulations made with the Regional Climate Model MAR. Accepted for publication in *Boundary Layer Meteorology*.
- Parish T. R., 1988 : Surface winds over the Antarctic continent: A review. *Rev. Geophys.*, 26(1), 169-180, doi:10.1029/RG026i001p00169
- Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor et H. L. Miller (eds.), 2007 : *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.