

Blizzard, très blizzard

Christophe Genthon⁽¹⁾, Alexandre Trouvilliez⁽¹⁾, Hubert Gallée⁽¹⁾,
Hervé Bellot⁽²⁾, Florence Naaim⁽²⁾, Vincent Favier⁽¹⁾ et Luc Piard⁽¹⁾

(1) Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE),
UJF-Grenoble 1/CNRS

54 rue Molière, BP 96, 38402 Saint-Martin-d'Hères

(2) Unité de recherche Érosion torrentielle, neige et avalanches (ETGR),
CEMAGREF, Saint-Martin-d'Hères, France

Résumé

Il y a 25 ans, était organisée une campagne d'observation et d'analyse des vents catabatiques en terre Adélie, l'une des régions du monde où ces vents se manifestent de façon particulièrement fréquente et violente. Frappés par une conséquence majeure de ces vents, la neige soufflée, les promoteurs de cette campagne affublaient alors la terre Adélie du titre de « Royaume du blizzard ». Depuis 2009, le CNRS et le CEMAGREF de Grenoble, avec le soutien de l'Institut polaire français (IPEV) et du programme cadre de l'Europe pour la recherche, déploient des instruments de mesure de la neige soufflée en terre Adélie afin de mieux caractériser ce phénomène, mieux le modéliser et ainsi mieux prévoir sa contribution à l'accumulation de la neige en Antarctique. Une évolution éventuelle de l'accumulation en réponse au changement climatique aura un impact sur le niveau global des mers.

Abstract

Antarctic blizzard

Twenty five years ago, a field campaign was designed to observe and analyze the katabatic winds of Adélie Land, a region where these winds are particularly strong and persistent. Impressed by one major consequence of the winds, the investigators then tagged Adélie Land, the "Blizzard Kingdom". Since 2009 the CNRS and CEMAGREF in Grenoble, with support from the French polar institute and the European framework program for research, have deployed and maintained instruments in Adélie Land to measure blowing snow, increase our understanding of the processes involved, improve blowing snow modeling, and better assess the contribution of blowing snow to surface accumulation. If Antarctic snow accumulation changes in response to climate change, this will have consequences for global sea-level.

En 1987, un ingénieur de la météorologie⁽¹⁾ publiait dans la revue *La Recherche* un article intitulé : « Vous avez dit blizzard ? ». Dans cet article, il décrivait les déploiements instrumentaux et les résultats d'une campagne de mesure des vents catabatiques à proximité de la station antarctique française de Dumont-d'Urville en terre Adélie (André, 1987). Il s'agissait de la campagne franco-américaine IAGO (Interaction Atmosphère Glace Océan). Après avoir souligné les aspects exceptionnels de cette campagne et des phénomènes étudiés, l'article se concluait sur cette phrase : « Les équipes françaises, séduites par le blizzard antarctique, pourraient alors poursuivre cette aventure. » Il aura fallu près de 25 ans pour que des équipes françaises déploient à nouveau un système de mesure *in situ* sur le bord de la calotte antarctique afin de poursuivre l'étude des vents catabatiques et de l'une de leurs conséquences spectaculaires, le blizzard.

Enjeux

Le blizzard est un phénomène connu des moyennes et hautes latitudes où chutes de neige et vents forts sont fréquents. Dans l'imaginaire du grand public français, ce sont probablement les vastes plaines canadiennes qui l'évoquent le mieux (Morris et Goscinnny, 1963) mais, comme le souligne André (1987), l'Antarctique est le royaume du blizzard. D'après l'encyclopédie en ligne Wikipédia, le blizzard est une « tempête de neige puissante et prolongée qui combine de basses températures avec des vents très forts, chargés de flocons de neige réduisant considérablement la visibilité générale ». Cette description coïncide avec les situations fréquemment rencontrées sur les marges de la calotte antarctique balayées

par des vents catabatiques puissants et prolongés, en particulier en terre Adélie et à la station côtière Dumont-d'Urville. Toutefois, ces situations ne sont pas nécessairement associées à des chutes de neige et, par conséquent, à des tempêtes, au sens météorologique le plus classique du terme. Il s'agit généralement de neige issue de chutes précédentes, érodée depuis la surface et soulevée par le vent, associée éventuellement, mais pas nécessairement, à de nouvelles précipitations. Ces situations affectent considérablement la visibilité et constituent un facteur de gêne et même de risque pour les opérations logistiques et scientifiques en Antarctique.

La part du phénomène d'érosion éolienne dans le bilan net de la neige accumulée en Antarctique est actuellement inconnue. L'érosion et le transport par le vent redistribuent la neige déposée. Si le transport se fait sur des distances suffisantes pour franchir les frontières de la calotte, il s'agit d'un export de masse vers l'océan et donc d'une perte nette de masse pour la calotte. De plus, la mise en suspension de la neige déposée augmente considérablement son évaporation par rapport à celle de la neige restée en surface (Gallée et al., 2001), ce qui contribue aussi à une perte de masse pour la calotte.

La question du bilan de masse de surface de la calotte antarctique est cruciale pour le niveau des mers. À l'heure actuelle, on estime que la quantité de neige accumulée annuellement à la surface de la calotte⁽²⁾ est égale à environ 170 mm par an (Van de Berg et al., 2006). Cela correspond à un volume d'eau tel que, s'il restait dans l'océan, toutes chose égales

(1) Jean-Claude André (Ndlr).

(2) Cette quantité de neige correspond à la précipitation moins les termes d'ablation dont potentiellement la neige soufflée.

par ailleurs, la surface de celui-ci s'élèverait d'environ 6 mm/an. C'est parce que la calotte flue sous son propre poids et s'écoule lentement vers les bords et vers l'océan, pour finalement exporter dans celui-ci une quantité équivalente de glace sous la forme d'icebergs, que le bilan net de masse totale de l'Antarctique est à peu près équilibré. Que l'un des termes de ce bilan total soit modifié, par une accumulation en surface ou par un écoulement glaciaire vers l'océan, et le niveau des mers est immédiatement affecté.

Jusqu'à une date récente, l'écoulement de la glace était considéré comme un processus à constante de temps longue ne pouvant contribuer à une perturbation significative du niveau des mers à l'échelle du siècle. Les efforts de prévision du changement climatique et de l'élévation consécutive du niveau des mers l'ignoraient donc (tout en soulignant le caractère incertain) et se concentraient sur les incertitudes liées au bilan de masse de surface, en relation directe avec l'atmosphère. Ce paradigme a été bouleversé par l'observation récente, par satellite en premier lieu, d'une accélération rapide de l'écoulement de certains fleuves de glace en Antarctique de l'ouest (Rignot, 2006). Cette observation remet en cause la compréhension que l'on pensait avoir de la dynamique glaciaire et, en particulier, de sa relation avec le réchauffement de l'océan. Il reste que l'incertitude sur la composante du bilan de masse de surface, en relation avec l'atmosphère, n'est pas levée.

Les modèles de climat prévoient une augmentation des précipitations antarctiques à la fin du XXI^e siècle. Selon une interprétation physique simple et facile, une atmosphère plus chaude peut contenir et donc transporter plus d'eau. Or, la calotte antarctique est alimentée par les chutes de neige issues de la condensation d'eau évaporée et transportée depuis l'océan. Le recyclage sur la calotte même reste très faible. Là s'arrête la facilité : les modèles de climat ayant contribué à la réalisation du dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) [IPCC, 2007] prévoient une augmentation des précipitations antarctiques comprise entre 0 et 50 % à la fin du XXI^e siècle (Genthon et al., 2009). La

précipitation moyenne étant nécessairement supérieure à l'accumulation moyenne, une augmentation de 50 % des précipitations actuelles impliquerait, à elle seule, une contribution négative à l'élévation du niveau des mers de l'ordre de 3 mm/an. C'est à peu près l'ampleur de l'élévation annuelle du niveau des mers actuellement observée.

Il s'agit donc d'une incertitude majeure sur les prévisions. Les précipitations antarctiques sont simulées par tous les modèles, même si ce n'est pas toujours de façon réaliste. En revanche, le terme négatif du bilan de masse de surface lié à l'érosion éolienne et au transport de la neige par le vent est ignoré dans tous les modèles ayant participé au dernier rapport du GIEC et il est probable qu'il le sera encore dans la plupart des modèles du prochain rapport. Pourtant, les quelques modèles régionaux spécifiquement développés pour la simulation météorologique antarctique, et qui incluent une paramétrisation explicite de la neige soufflée (Gallée et al., 2001, 2005 ; Lenaerts et Van den Broeke, 2011), suggèrent que celle-ci contribue significativement au bilan de masse de surface. Ce processus pourrait être responsable d'une part de ce bilan de l'ordre de 5 à 10 % (ce chiffre peut atteindre localement près de 100 % dans les régions dites de « glace bleue », Genthon et al., 2007). Par manque d'observations *in situ*, ces modèles sont toutefois peu validés. Ce déficit d'observations résulte du manque d'instruments destinés à la mesure de la neige soufflée et de la difficulté à les faire fonctionner dans un environnement extrême caractérisé par des températures basses et des vents violents.

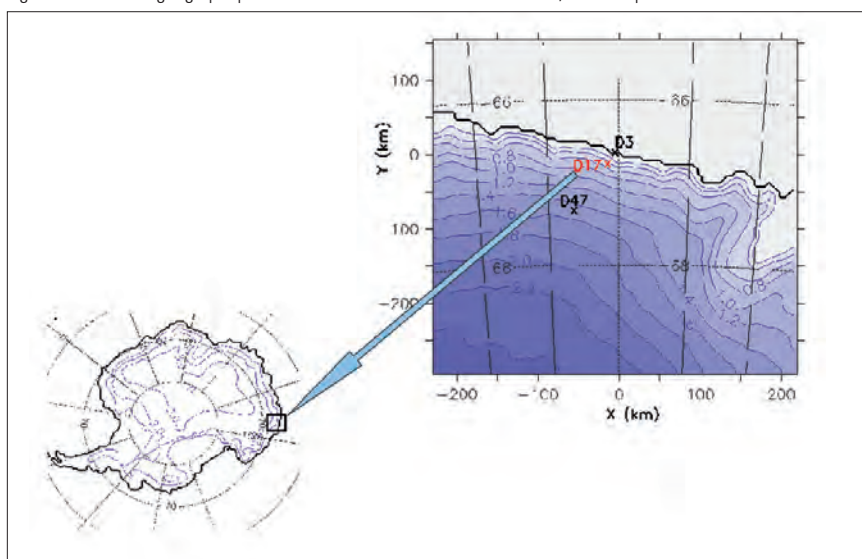
La campagne ICNES

L'acquisition d'observations pour la validation de la modélisation de la neige soufflée exige au moins trois conditions : 1) un site approprié pour l'observation et la mesure de la neige soufflée ; 2) un support logistique pour accéder à ce site, y déployer et y entretenir les instruments nécessaires ; 3) un support financier suffisant pour acquérir et/ou adapter des instruments de mesure appropriés.

La conjonction de ces trois conditions a permis qu'une campagne pluriannuelle d'observation de la neige soufflée antarctique soit mise en œuvre depuis 2009 par le Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE) et le Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (CEMAGREF) de Grenoble.

Comme l'a souligné André (1987), la terre Adélie est le royaume des vents catabatiques et du blizzard, on y a mesuré des vents de plus de 300 km/h⁽¹⁾. La terre Adélie a donc été choisie comme site d'observation (première condition, figure 1). La station scientifique Dumont-d'Urville se trouve sur une île à 5 km au large de la calotte antarctique elle-même. Toutefois, l'Institut polaire français Paul-Émile Victor (IPEV), en collaboration avec le programme italien de recherches antarctiques (PNRA), met en œuvre pendant l'été austral une station sur le bord de la calotte, face à Dumont-d'Urville : la station Cap-Prud'homme (voir l'encadré). Si elle est surtout dédiée aux activités logistiques de préparation des convois de tracteurs et traîneaux qui ravitaillent la station franco-italienne Concordia à 1 100 km à l'intérieur du continent, cette

Figure 1 - Situation géographique des sites d'observation en terre Adélie, Antarctique.



(1) <http://terreadelie.sblanc.com/pages/vent-catabatique.htm>

Qui était André Prud'homme ?

Ingénieur de la Météorologie nationale et spécialiste de la météorologie polaire, André Prud'homme fut nommé responsable de la troisième expédition antarctique française en 1958.

Savant et homme de terrain, il disparaît dans une violente tempête de neige durant l'Année géophysique internationale, le 7 janvier 1959, alors qu'il était en mission à la base scientifique française de l'Antarctique en terre Adélie. Il était âgé de 38 ans. Il a donné son nom au cap Prud'homme où a été construite la station côtière estivale du même nom.

Le prix André Prud'homme de la Société météorologique de France honore la mémoire de ce chercheur et récompense, chaque année, une thèse de doctorat en météorologie, physique-chimie de l'atmosphère, paléoclimatologie, climatologie ou encore en océanographie.



André Prud'homme.

station permet également d'accueillir des scientifiques et leur procure un support logistique sur la calotte elle-même. Mieux, la route ouverte tous les ans vers la station Concordia permet à ces scientifiques de se déplacer vers l'intérieur de façon à échantillonner des environnements variés (force des vents, températures, accumulations moyennes, etc.). Ceci permet de remplir la condition 2.

La troisième condition a bénéficié d'une volonté des instances européennes de prévoir, aussi rapidement et précisément que possible, l'élévation du niveau des mers au cours de ce siècle, de manière à ce que les pays membres de l'Union européenne puissent prendre à temps les mesures nécessaires pour faire face à ce phénomène. On ne reviendra pas sur l'exemple des Pays-Bas dont une partie importante du territoire se situe sous le niveau des mers ; la France métropolitaine, avec ses quelques 4 000 km de côtes, est également très exposée. Des ressources financières substantielles ont donc été obtenues à travers le projet européen de recherche Ice2Sea (lire *Ice to sea*, <http://www.ice2sea.eu/>) pour qu'une campagne pluriannuelle d'observation et de quantification de la neige soufflée puisse être réalisée, avec le soutien de l'IPEV (programme CALVA⁽²⁾). Cette campagne se nomme ICNES (Ice2Sea Calva Neige Soufflée). Les données obtenues serviront à améliorer et à

(2) Calibration et validation de modèles météorologiques et climatiques et de restitutions satellitaires de la côte antarctique jusqu'au dôme C (Ndlr). <http://lgge.osug.fr/~christo/calva/home.shtml>.

valider la modélisation de la neige soufflée dans le Modèle atmosphérique régional (MAR) développé au LGGE et à l'Institut d'astronomie de l'université de Louvain-la-Neuve (Belgique). Il est l'un des rares à prendre explicitement en compte ce processus.

Le déploiement d'une première station de mesure *in situ* de la neige soufflée antarctique date de janvier 2009, au site de D3, à environ 1 km de la côte (figure 1), qui est facilement accessible depuis la station Cap-Prud'homme. Sur ce site ont été installés trois tubes FlowCapt, commercialisés par la société IAV (Ingénierie Acoustique Vibratoire), ainsi qu'une station météorologique automatique de base (vent, température et humidité) incluant la mesure par sonde ultrasonique de la hauteur de neige accumulée (figure 2).

Figure 2 - La station de mesure de neige soufflée à D3. Au premier plan, les 3 tubes FlowCapt superposés bout à bout en position verticale. À l'arrière plan, une station météorologique et la « pyramide » énergie (éolienne et panneaux solaires) alimentant l'ensemble. (© Christophe Genthon, CNRS/LGGE)



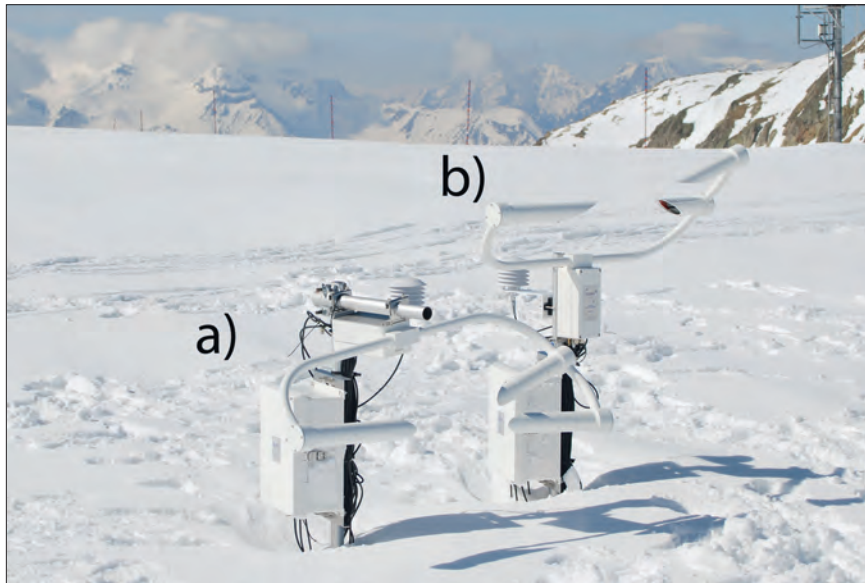


Figure 3 - Le PWS en test au site du col du Lac Blanc : a) en position basculée pour la mesure de la neige soufflée et b) en position normale pour la mesure des précipitations. (© Hervé Bellot, CEMAGREF)

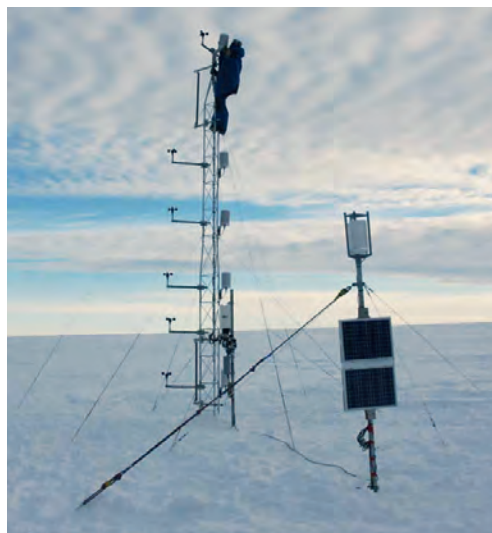
Un tube FlowCapt contient un microphone : en effet, le bruit qu'engendrent les particules de neige transportées par le vent en heurtant le tube permet de détecter l'occurrence de neige soufflée. En principe, la pression acoustique dans le tube peut être liée au flux de neige transportée (Chritin et al., 1999), mais la validité de cette quantification a récemment été mise en doute (Cierco et al., 2007). Dans un premier temps, nous n'utiliserons donc ces instruments que pour détecter les événements de neige soufflée (Gallée et al., 2011).

L'objectif visé est bien de valider la simulation de la contribution du processus de neige soufflée au bilan de masse de surface. Ce sont donc *in fine* les quantités érodées et transportées que nous cherchons à mesurer. Il n'existe malheureusement que peu d'instruments dédiés à la mesure de la neige soufflée. Depuis de nombreuses années, le CEMAGREF de Grenoble s'intéresse à cette mesure en région alpine pour en évaluer et en prévoir les conséquences en termes de risques (congères et avalanches). Il a évalué plusieurs instruments sur son site d'étude du col du Lac Blanc dans les Alpes. L'instrument FlowCapt présente l'intérêt d'une bonne compacité, d'une faible consommation d'énergie et d'un concept simple qui limite les risques de panne. Ce sont des qualités cruciales pour des mesures en milieu difficile et isolé. Cet instrument est utilisé par les gestionnaires de stations de ski

et de réseaux routiers pour détecter l'occurrence de neige soufflée et ainsi analyser le risque d'avalanche ou de formation de congères. Toutefois, ainsi qu'il a été noté précédemment, le modèle déployé en 2009 n'était pas approprié pour la mesure des flux.

Les disdromètres sont des instruments conçus pour détecter et compter les hydrométéores en déplacement. Ils estiment la taille et la vitesse des particules par leur impact (diffusion et transmission) sur un faisceau lumineux lorsqu'elles traversent celui-ci. Ces instruments sont surtout prévus pour estimer les précipitations, donc des hydrométéores se déplaçant verticalement. Un disdromètre a spécifiquement été conçu pour la mesure de la neige soufflée, donc des particules de petite

Figure 4 - La tour instrumentée de 7 mètres en cours de déploiement à D17. (© Alexandre Trouvilliez, CNRS/LGGE)



taille se déplaçant horizontalement et rapidement : le Snow Particle Counter ou SPC (Sato et al., 1993). Cet instrument est utilisé comme référence dans les campagnes de mesure conduites sur le site du Lac Blanc. Toutefois, la puissance électrique nécessaire (environ 200 W) le rend inapte à un déploiement hors d'une station permanente.

C'est pourquoi, pour la campagne ICNES, nous tentons plutôt de détourner de leur usage normal des disdromètres, en principe destinés à la mesure des précipitations, mais nécessitant une puissance limitée (environ 5 W) qui peut être obtenue, été comme hiver, avec des panneaux solaires et des éoliennes de taille modérée. C'est le cas du VPF-730 de Biral qui identifie les particules traversant un faisceau lumineux cylindrique. Il reste à reconnaître celles de ces particules qui sont de la neige soufflée plutôt que de la neige précipitante (Bellot et al., 2011). Le PWS (Present Weather Sensor) de Campbell Scientific détecte et compte les particules qui traversent successivement trois nappes lumineuses. La taille et la vitesse des particules sont identifiées par le temps qu'elles mettent à traverser chaque nappe et à passer d'une nappe à la suivante. En fonctionnement normal, les nappes sont horizontales. Afin de mesurer les particules en déplacement horizontal, nous basculons ces nappes selon une orientation verticale. Cette configuration a d'abord été testée sur le site du Lac Blanc (figure 3) au cours de l'hiver 2008-2009, en comparaison avec l'instrument SPC, avant un déploiement en Antarctique au cours de la saison d'été austral 2009-2010.

Au cours de cette même saison, deux autres stations de mesure étaient installées plus loin sur la calotte alors que la première station FlowCapt, déployée en 2008-2009 à D3, a été révisée et les données enregistrées sur place récupérées. Un système de mesures météorologiques avait été installé en 1977 au site de D17, à environ 10 km de la côte. On y retrouve encore les vestiges d'une tour de profilage. D17 est un site intéressant car il est encore très accessible depuis Cap-Prud'homme et les relevés d'accumulation y montrent un fort gradient spatial sur une distance de l'ordre du kilomètre (Agosta et al., 2011). Un profilage du vent sur une hauteur de 7 mètres a été mis en place pour la campagne ICNES (figure 4). La structure verticale du vent doit permettre d'estimer la friction en surface, une information déterminante pour la paramétrisation de l'érosion éolienne. Des

instruments FlowCapt de nouvelle génération, dont on espère pouvoir tirer une meilleure information sur les flux, ont été installés en haut et en bas de la tour, de façon à estimer le profil vertical de la neige soufflée. Un instrument PWS « basculé » a également été installé à D17. Le troisième site de mesure est le point D47, à environ 100 km de la côte (figure 1), bien connu des opérateurs des convois de ravitaillement de la station Concordia pour ses vents et ses blizzards particulièrement fréquents et violents. Ici, pas de tour mais, à nouveau, deux FlowCapt déployés sur une hauteur de 2 mètres et un PWS basculé.

Notons que des mesures météorologiques automatiques de base sont également assurées en terre Adélie dans le cadre d'autres programmes. Le programme d'observatoire GLACIO-CLIM⁽¹⁾ entretient une station sur la côte même. Deux stations de l'AMRC (Antarctic Meteorological Research Center, en partenariat avec la National Science Foundation et l'université du Wisconsin) ont été installées à D10 (à 5 km de la côte) et à D47, dans les années 1980. La logistique de leur entretien est assurée par l'IPEV depuis cette époque. La station de l'AMRC confirme, avec un recul de plus de 20 ans, que D47 est un site particulièrement venté.

L'intérêt de ces mesures réside dans leur rareté : il est très difficile de les obtenir dans les conditions météorologiques extrêmes des régions où elles sont opérées. Ces conditions mettent non seulement les instruments à rude épreuve mais elles interdisent aussi l'accès aux sites de mesure en dehors de la saison d'été. Ce n'était donc pas sans une certaine appréhension que les diverses stations de mesure du programme ICNES ont été visitées au cours de la saison d'été austral 2010-2011, près d'un an après leur déploiement. En particulier, c'est avec beaucoup de soulagement que le mât de 7 mètres a été retrouvé intact. En revanche, trois des six anémomètres installés l'année précédente sur le mât étaient hors d'usage et l'un des tubes FlowCapt était également en panne. Le fonctionnement des PWS basculés n'a pas non plus été totalement satisfaisant : les performances des éoliennes devant fournir l'énergie nécessaire en hiver se sont révélées décevantes et une partie seulement des données convoitées a effectivement été enregistrée.

L'expérience du travail en Antarctique rend pourtant philosophe et ce bilan, que l'on pourrait juger mitigé, est en fait plutôt satisfaisant. Les données obtenues, toutes partielles, restent uniques et d'une grande valeur pour l'évaluation des modèles.

Quelques brefs résultats

Les résultats d'une simulation à très haute résolution (5 km horizontalement et 2 m verticalement près de la surface) du modèle MAR sont présentés sur la figure 5 (Gallée et al., 2011). On note un très bon accord des vents simulés avec l'observation, ce qui est un prérequis pour une simulation correcte de la neige soufflée. Les épisodes de neige soufflée, qui correspondent en effet aux épisodes de vent fort, sont également bien reproduits. Le modèle simule des flux *a priori* raisonnables et qui diminuent avec la hauteur mais que nous ne pouvons pas encore valider par l'observation puisque l'étalonnage des instruments disponibles en 2009 n'est pas satisfaisant, ainsi qu'il est indiqué plus haut. Pour cette même raison, les flux faibles du modèle au début de l'épisode du 27-29 janvier (au moment où les instruments indiquent au contraire des flux élevés) ne signalent pas nécessairement un biais majeur de la modélisation. Ces flux faibles, alors que les vents sont déjà forts, résultent des températures chaudes qui ont précédé l'événement. Dans le modèle, ces

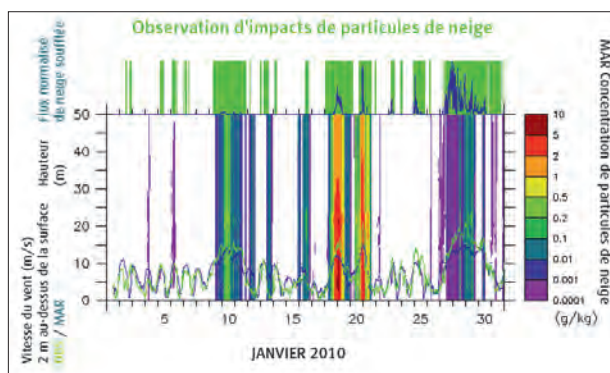


Figure 5 - Événements de neige soufflée observés à D3 en janvier 2010 (en vert sur l'axe supérieur) et simulation par le modèle MAR des concentrations de particules de neige soufflée (échelle de couleur). Les vents mesurés et simulés sont également portés (courbes verte et bleue). Extrait de Gallée et al., 2011.

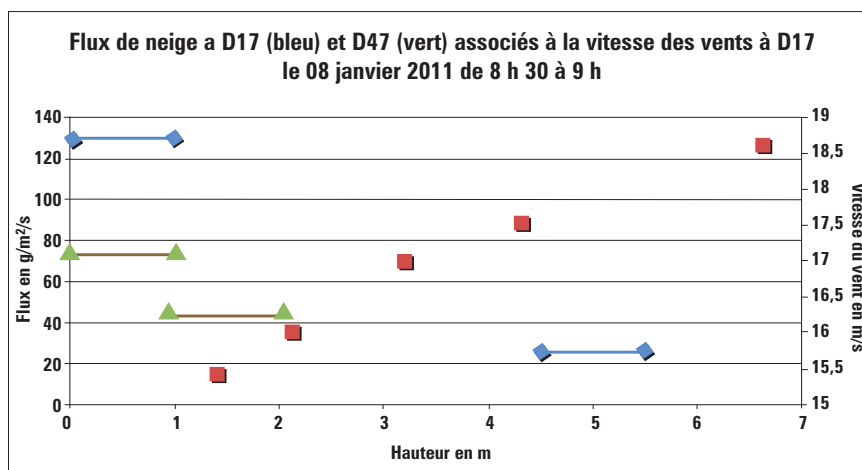
températures ont favorisé, peut-être à outrance, la cohésion mécanique du manteau neigeux de surface et sa résistance à l'érosion.

Les modèles de FlowCapt installés par la suite à D17 et à D47 sont plus récents. Bien qu'une vérification précise de l'étalonnage n'ait pas encore été réalisée, la figure 6 montre, sur la tour de D17, des profils verticaux de neige soufflée beaucoup plus raisonnables que ceux fournis par les exemplaires plus anciens. La diminution des flux avec l'altitude au-dessus de la surface conforte les résultats de la modélisation (figure 5). Les gradients de vents mesurés, alors que les six anémomètres étaient encore opérationnels, sont également réalistes.

Le programme ICNES se poursuit

Nous n'en sommes qu'aux préliminaires de l'exploitation d'un jeu unique de données d'observation de la neige

Figure 6 - Exemple de profil de vent, le long de la tour de D17, et de flux horizontal de neige soufflée, le 8 janvier 2011.



(1) <http://www-igge.ujf-grenoble.fr/ServiceObs/SiteWebAntarc/background.html>

soufflée antarctique encore en cours d'obtention. Alors que ces lignes sont écrites, trois douzaines d'anémomètres, de thermomètres, d'hygromètres et d'instruments divers pour la caractérisation de la neige soufflée sont en train de recueillir (nous l'espérons !) les données qui permettront de poursuivre l'amélioration de notre compréhension de l'accumulation de la neige à la surface de la calotte antarctique et d'asseoir la confiance que nous pouvons avoir dans les modèles de simulation. Ces appareils fonctionnent en isolation totale et en mode entièrement automatique. Toutefois, certaines des méthodes de mesure les plus fiables de la neige soufflée ne peuvent être mises en œuvre dans de telles conditions. Il s'agit des mesures par filet (opération manuelle) ainsi que par le SPC (nécessitant beaucoup d'énergie). Dumont-d'Urville est une station permanente, occupée tout au long de l'année par des scientifiques qui, avec le soutien du personnel logistique de l'IPEV, peuvent assurer, même en hiver, des observations nécessitant une intervention humaine ou beaucoup d'énergie. À la fin de la saison d'été 2010-2011, un SPC, un PWS basculé et des supports de filets ont été installés, côte à côte, sur un site permettant aux hivernants de réaliser des mesures. À cette période de l'année, bien que n'étant pas situé sur la calotte elle-même, Dumont-d'Urville est entouré d'un pack compact de glace de mer sur lequel la neige peut s'accumuler et être remobilisée pour donner lieu à des événements de blizzard marqués. La campagne ICNES dispose donc, au moins pour 2011, d'un site de mesure supplémentaire où les observations en hiver, si elles ne sont pas nécessairement tout à fait représentatives de la calotte, sont particulièrement bien contrôlées.

En décembre 2011, une équipe du LGGE quittera à nouveau Grenoble pour se rendre sur le terrain antarctique pour relever les données des différentes stations et entretenir le matériel en vue de la poursuite du programme. On

attend de cette campagne une nouvelle moisson de mesures, plus complète grâce aux améliorations apportées au système au cours des campagnes de terrain précédentes. Toutefois, ce sera toujours avec un peu d'appréhension que l'on s'approchera des sites isolés : que restera-t-il des systèmes précédemment déployés ? Chaque saison apporte son lot de déconvenues mais aussi de satisfactions. Surtout, l'expérience de chaque saison vient enrichir la connaissance d'un milieu hostile mais fascinant et notre capacité à l'échantillonner et donc à le comprendre.

Bien entendu, le soutien financier du programme européen Ice2Sea n'aura qu'un temps. Il sera nécessaire, à un moment ou à un autre, de diminuer la voile. Toutefois, avec le soutien de l'IPEV et de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble (OSUG), nous comptons poursuivre cette aventure dans la durée. En effet, la variabilité météorologique et climatique en Antarctique est notoirement élevée. Une étude (Genthon et al., 2007) s'est intéressée à une zone dite de « glace bleue », à proximité de la station Cap-Prud'homme. Cette glace bleue reflète un bilan de masse négatif en surface. Les auteurs concluent que, pour l'essentiel, ce bilan est négatif à cause du vent qui érode la surface et exporte la neige soulevée vers l'océan. Mais ils signalent également que cette glace n'est pas aussi bleue tous les ans et que, certaines années, elle est recouverte d'un épais manteau de neige transformée, alors qu'elle est essentiellement à vif d'autres années. Ce n'est que dans la durée que le rôle de la neige soufflée pourra être pleinement caractérisé, en assurant une continuité d'observation, donc dans un contexte d'observatoire. Plus généralement, l'isolement et la difficulté d'accès font que l'Antarctique connaît un déficit cruel d'observations, à caractère météorologique en particulier. L'Organisation météorologique mondiale (OMM) le reconnaît qui propose le

renforcement d'un réseau d'observation en Antarctique, AntON (Antarctic Observing Network) [OMM, 2011]. Les recommandations incluent la multiplication des systèmes d'observation météorologique et leur maintien sur le long terme.

Au-delà des questions soulevées par les processus de neige soufflée, l'interface atmosphère-surface présente différentes particularités lorsque cette surface est constituée de neige : albédo élevé, capacité calorifique faible, milieu poreux, contrôle de la température de surface en cas de fonte, inversions de température dans l'atmosphère, etc. Un regroupement de systèmes d'observation à l'interface air-neige s'est constitué : CENACLAM (Climatologie des échanges neige-atmosphère, de la couche limite atmosphérique et du manteau neigeux). Il réunit les sites de Météo-France et du CEMAGREF au col de Porte et au col du Lac Blanc dans les Alpes, les sites décrits dans le cadre de la campagne ICNES en terre Adélie et des observations de la couche limite atmosphérique et de la neige réalisées sur le plateau antarctique, à proximité de la station Concordia. Bénéficiant du soutien logistique de l'IPEV pour ce qui concerne les activités antarctiques, ce regroupement est reconnu par l'OSUG. Il est attendu que ce statut d'atelier d'observation régional évolue dans le futur vers un label d'observatoire national.

Remerciements

Cette campagne d'observation de la neige soufflée en Antarctique n'aurait pu avoir lieu sans le soutien logistique et financier de l'IPEV. Elle est organisée dans le cadre du programme CALVA (programme IPEV 1013). L'autre soutien majeur est celui du 7^e programme cadre de l'Europe à travers le projet Ice2Sea. Les données obtenues contribuent à l'observatoire CENACLAM de l'OSUG.

Bibliographie

- **Agosta C., V. Favier, C. Genthon, H. Gallée, G. Krinner, J. T. M. Lenaerts et M. R. van den Broeke**, 2011 : A 40-year surface accumulation dataset for Adélie Land, Antarctica and its application for model validation. *Clim. Dyn.*, sous presse. Accessible en ligne sur le site de la revue.
- **André J.-C.**, 1987 : Des chercheurs dans le vent : vous avez dit blizzard ? *La Recherche*, 192, 1254-1256.
- **Bellot H., A. Trouvilliez, F. Naaim-Bouvet, C. Genthon et H. Gallée**, 2011 : Present weather sensor tests for measuring drifting snow. *Ann. Glaciol.*, 52(58), 176-184.
- **Chritin V., R. Bolognesi et H. Gubler**, 1999 : FlowCapt: a new acoustic sensor to measure snowdrift and wind velocity for avalanche forecasting. *Cold Regions Science and Technology*, 30, 125-133.
- **Cierco F.-X., F. Naaim-Bouvet et H. Bellot**, 2007 : Acoustic sensors for snowdrift measurements: How should they be used for research purposes? *Cold Regions Science and Technology*, 49, 74-89

- **Gallée H., G. Gyomarc'h** et **E. Brun**, 2001 : Impact of the snow drift on the antarctic ice sheet surface mass balance: a sensitivity study to snow surface properties. *Bound.-Layer Meteor.*, 99, 1-19.
 - **Gallée H., V. Peyaud** et **I. Goodwin**, 2005 : Temporal and spatial variability of the Antarctic Ice Sheet Surface Mass Balance assessed from a comparison between snow stakes measurements and regional climate modeling. *Ann. Glaciol.*, 41, 17-22.
 - **Gallée H., A. Trouvilliez, C. Agosta, C. Genthon** et **V. Favier**, 2011 : Transport of snow by the wind: A comparison between observations made in Adélie Land, Antarctica, and simulation made by the regional climate model MAR. *Bound.-Layer Meteor.*, soumis.
 - **Genthon C., P. Lardeux** et **G. Krinner**, 2007 : The surface accumulation and ablation of a blue ice area near Cap Prud'homme, Adélie Land, Antarctica. *J. Glaciol.*, 53, 635-645.
 - **Genthon C., G. Krinner** et **H. Castebrunet**, 2009 : Antarctic precipitation and climate change predictions: Horizontal resolution and margin vs plateau issues. *Ann. Glaciol.*, 50, 55-60.
 - **IPCC**, 2007 : *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.
 - **Lenaerts J. T. M.** et **M. R. van den Broeke**, 2011 : Regional climate modeling of snowdrift in Antarctica, part 2: Results. *J. Geophys. Res.*, soumis.
 - **Morris (M. De Bevere)** et **R. Gosciny**, 1963 : Les Dalton dans le blizzard. *Lucky Luke*, 22, éditions Dupuis.
 - **OMM**, 2011 : Organisation météorologique mondiale, résolution EC-LXIII/Doc. 3(3), approuvée au cours de la 63^e session du Conseil exécutif, Genève, 6-8 juin 2010.
 - **Rignot E.**, 2006 : Changes in ice dynamics and mass balance of the Antarctic ice sheet. *Philos. Trans. Roy. Soc., A*, 364, 1637-1655.
 - **Sato T., T. Kimura, T. Ishimaru** et **T. Maruyama**, 1993 : Field test of a new snow-particle counter (SPC) system. *Ann. Glaciol.*, 18, 149-154.
 - **Van de Berg W. J., M. R. van den Broeke, C. H. Reijmer** et **E. van Meijgaard**, 2006 : Reassessment of the Antarctic surface mass balance using calibrated output of a regional atmospheric climate model. *J. Geophys. Res.*, 111, doi:10.1029/2005JD006495.
-