

ENCADRÉS SCIENTIFIQUES

de l'unité de recherche

CEN

CEN-1 Modélisation distribuée de la production en eau du haut bassin versant nivoglacière d'un glacier tropical

Les glaciers andins, situés dans une région clé pour la dynamique du climat mondial, en sont d'excellents indicateurs de variabilité. Leurs apports en eau maintiennent en saison sèche des débits d'étiage minimums, essentiels pour les populations vivant au pied des cordillères (tant pour l'hydroélectricité que l'eau potable).

Pour prévoir le devenir nivoglacière des hauts bassins andins, il importe au préalable de savoir reproduire sous le climat actuel l'évolution de la glace et de la neige et celle du débit des rivières. Faisant suite à des applications des modèles de manteau neigeux détaillés Crocus et ISBA-Crocus sur des sites locaux, une modélisation hydro-nivale distribuée du haut bassin versant du Rio Zongo (3.3 km²) englacé à 63 % a été mise en œuvre pendant une période totale de 19 mois. Issue d'une collaboration entre le CNRM-GAME, l'IRD et le LGGE, elle s'appuie sur les mesures de surface du SOERE GLACIOCLIM (Figure 1).



Figure 1 – Station météorologique sur glacier (photo P. Wagon - IRD)

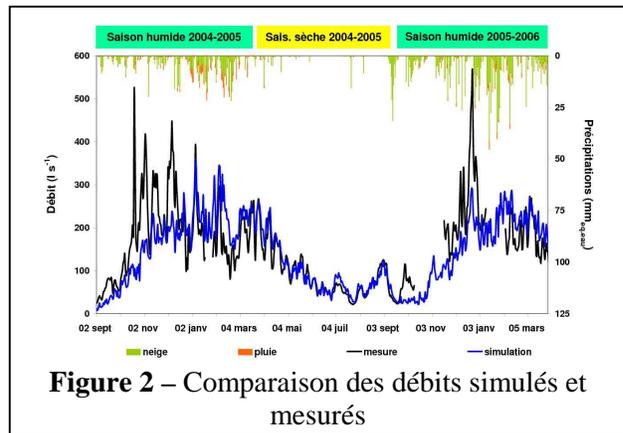


Figure 2 – Comparaison des débits simulés et mesurés

Adaptés au contexte glaciaire, via l'introduction d'une représentation de la fraction d'enneigement, et aux caractéristiques du climat tropical, via un nouveau paramétrage de l'albédo des cristaux de neige fraîche, etc., les modèles se sont révélés performants pour simuler l'enneigement fugace des moraines, les variations de masse du glacier et au final, les débits du torrent émissaire (Figure 2). En complément à la validation de la modélisation, le fonctionnement nivo-hydrologique du haut bassin a été précisé quant à la distribution, en fonction de l'altitude et de la saison, des contributions en eau des surfaces glaciaires et morainiques, et la très forte vulnérabilité du glacier à un accroissement de +1°C de la température de l'air.

Références

Gascoin, S., A. Ducharne, P. Ribstein, **Y. Lejeune** and P. Wagon (2009) : Dependence of bare soil albedo on soil moisture on the moraine of the Zongo glacier (Bolivia): Implications for land surface modelling. *Journal of Geophysical Research*, 114, D19102 doi:10.1029/2009JD011709.

Lejeune, Y., P. Wagon, L. Bouilloud, P. Chevallier, P. Etchevers, E. Martin, E. Sicart and F. Habets (2007) : Melting of snow cover in a tropical mountain environment in Bolivia : Processes and modeling. *Journal of Hydrometeorology*, 8(4), 922-937.

Soruco, A., C. Vincent, B. Francou, P. Ribstein, T. Berger, J.E. Sicart, P. Wagon, Y. Arnaud, V. Favier and **Y. Lejeune** (2009) : Mass balance of Zongo glacier, Bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods. *Annals of Glaciology*, 50(50), 1-8, doi:10.3189/172756409787769799.

Lejeune, Y., 2009 : Apports des modèles de neige CROCUS et de sol ISBA à l'étude du bilan glaciologique d'un glacier tropical et du bilan hydrologique de son bassin, thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, 358 pp, <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00480008/fr/>.

Le manteau neigeux est généralement perçu comme une enveloppe isolante préservant le sol des variations de température atmosphériques. Néanmoins, les propriétés thermiques de la neige sont très variables et leur prise en compte dans les modèles de manteau neigeux est incomplète pour simuler finement le régime thermique des sols sous des climats différents. En outre, une bonne représentation des propriétés thermiques du manteau neigeux est requise pour simuler de façon réaliste son bilan d'énergie et l'évolution temporelle de ses propriétés thermiques, optiques et mécaniques. L'air et la glace, constituants principaux de la neige, possèdent des conductivités thermiques de l'ordre de 0,02 et 2,3 W/(m.K) respectivement. Les transferts thermiques sont donc environ 100 fois plus faciles dans la glace que dans l'air. Dans la neige, ils s'effectuent surtout dans la glace, à travers les grains et leurs points de contact. La conductivité thermique de la neige est donc intimement liée à l'organisation tridimensionnelle du réseau de cristaux de glace qui la compose. Cette dernière évolue sous l'effet des métamorphoses de la neige, qui dépendent en grande partie du gradient vertical de température.



Figure 1 – Insertion des sondes dans la neige au col de Porte (Chartreuse, 1310m alt.)

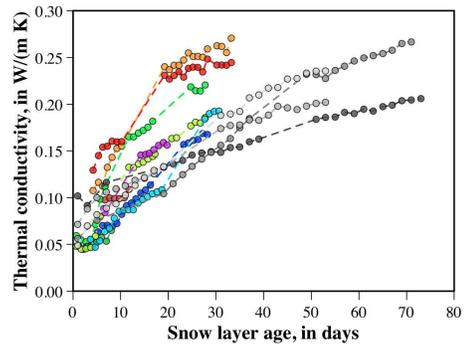


Figure 2 – Evolution temporelle de la conductivité thermique de la neige

Des sondes enfouies dans la neige permettent de mesurer sa conductivité thermique (figure 1). Cette méthode a été mise en œuvre pour la première fois en continu sur le terrain en collaboration avec le LGGE (CNRS/Univ. Joseph Fourier, Grenoble) pour suivre l'évolution de la conductivité thermique du manteau neigeux dans les Alpes. La conductivité thermique des couches de neige fraîche est faible, généralement de l'ordre de 0,05 W/m.K, ce qui confirme le caractère très isolant de ce type de neige. Elle augmente après la chute, traduisant des transformations rapides de ses propriétés physiques. L'augmentation de la conductivité thermique avec le temps (figure 2) s'explique au premier ordre par la densification sous l'effet du tassement, qui contribue à augmenter la densité de points de contact entre les cristaux de glace dans la neige. Néanmoins, la densification seule n'explique pas la variabilité de la conductivité thermique de la neige.

La modélisation à l'échelle microscopique et macroscopique est indispensable pour mieux comprendre et représenter l'évolution des propriétés thermiques de la neige au cours du temps.

Références

Morin., S., F. Domine, L. Arnaud and G. Picard, In-situ monitoring of the effective thermal conductivity of snow, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 64, 73–80, doi : [10.1016/j.coldregions.2010.02.008](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.02.008), 2010. Page 57

La neige est un milieu poreux constitué d'un mélange de grains de glace, d'air et parfois d'eau liquide, qui ne cesse de se transformer au cours du temps. La modification de sa structure interne, appelée « métamorphose », résulte de phénomènes thermodynamiques et mécaniques interagissant au sein du manteau neigeux. En effet, l'évolution thermodynamique d'un ensemble de grains de neige peut mener à un amincissement de certains ponts de glace, et donc à leur déformation, entraînant une réorganisation mécanique des grains entre eux. Inversement, dans le manteau neigeux, le poids des couches supérieures modifie la géométrie et l'agencement des grains de glace, ce qui influe sur la thermodynamique des métamorphoses. Une bonne compréhension du comportement mécanique de la neige à l'échelle des grains est donc indispensable à une meilleure modélisation des métamorphoses de neige. Dans le cadre du projet « Snow-White », financé par l'ANR, coordonné par J. Meyssonier (LGGE) et regroupant plusieurs laboratoires grenoblois, nous nous sommes ainsi intéressés aux mécanismes de déformation lente de la neige en étudiant l'évolution de petits échantillons (environ $8 \times 8 \times 8 \text{ mm}^3$) soumis à des essais de compression uniaxiale. Pour cela, nous avons réalisé plusieurs séries d'images tomographiques d'un même échantillon se déformant au cours du temps.

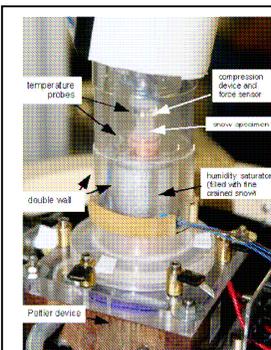


Figure 1 –
Réalisation d'un
essai de
compression
uniaxiale dans notre
cellule cryogénique
($T_{\text{int}} = -15^\circ\text{C}$, $T_{\text{ext}} =$
 $+23^\circ\text{C}$)

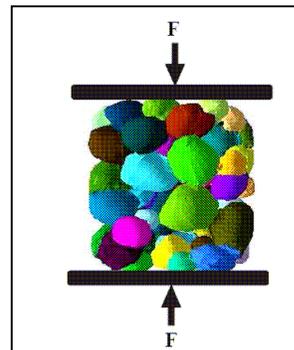


Figure 2 –
Modélisation par
DEM d'un test de
compression à partir
de la géométrie réelle
de l'échantillon
enregistrée par DCT
(Diamètre de
l'échantillon : 8 mm)

Pour mieux appréhender l'importance du caractère anisotrope de la glace sur le comportement mécanique de la neige, nous avons complété nos observations avec des images obtenues par DCT (Diffraction Contrast Tomography), une technique récemment mise au point par W. Ludwig (ESRF et MATEIS) qui permet d'accéder aux orientations cristallines des grains constituant le matériau imagé. Les premiers résultats expérimentaux sont actuellement confrontés à deux modèles mécaniques distincts : un modèle analytique développé par François Nicot (Cemagref) et un Modèle par Éléments Discrets (DEM) mis au point par un groupe de chercheurs du laboratoire 3S-R (coordination Félix Darve). En plus de son impact en terme de modélisation mécanique de la neige à micro-échelle, ce projet a permis de développer ou d'améliorer différents outils indispensables à l'étude de la microstructure de la neige : on notera la mise au point d'un algorithme de segmentation en grains et sa validation par DCT, ou bien la réalisation de séries d'images tomographiques d'un échantillon à température négative sous rayonnement X dans une salle d'acquisition à température ambiante, via l'utilisation d'une cellule cryogénique développée pour l'occasion.

Références

- Gillibert, L., Flin, F., Kozicki, J., Rolland du Roscoat, S., Ludwig, W., Coeurjolly, D., Chareyre, B., Philip, A., Lesaffre, B. and Meyssonier, J.: Curvature-driven grain segmentation and its validation using snow images obtained by Diffraction Contrast Tomography, in *Proceedings of W3D*, in press.
- Rolland du Roscoat, S., King, A., Philip, A., Reischig, P., Ludwig, W., Flin, F. and Meyssonier, J.: Analysis of snow microstructure by means of X-ray Diffraction Contrast Tomography, *Adv. Eng. Mater.*, doi : 10.1002/adem.201000221, in press.

La surface spécifique (SS) de la neige représente l'ensemble des surfaces développées d'interface air/glace par unité de masse de neige et est généralement exprimée en $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$. Cette définition permet de calculer le rayon d'une assemblée de sphères identiques ayant le même rapport surface/volume que la neige, dénommé rayon optique : $SS = 3 / (r_{\text{opt}} \cdot \rho_{\text{glace}})$. La surface spécifique peut être calculée à l'échelle microscopique, notamment par le biais d'algorithmes appliqués à des images tridimensionnelles (3D) obtenues par tomographie X (figure 1). Cette quantité est importante pour le bilan chimique et énergétique du manteau neigeux car elle contrôle son albédo dans le domaine proche infra-rouge du spectre solaire. En outre, elle gouverne pour une large part la signature du manteau neigeux en télédétection micro-onde active et passive. Le métamorphisme de la neige modifie sa SS, faisant d'elle une variable diagnostique de son évolution micro-structurale. Au cours de la saison 2009-2010, un suivi hebdomadaire systématique de la surface spécifique a été conduit au Col de Porte (Chartreuse, 1310m d'alt.), afin d'en mesurer la variabilité verticale et temporelle avec une finesse alors inégalée (figure 2).

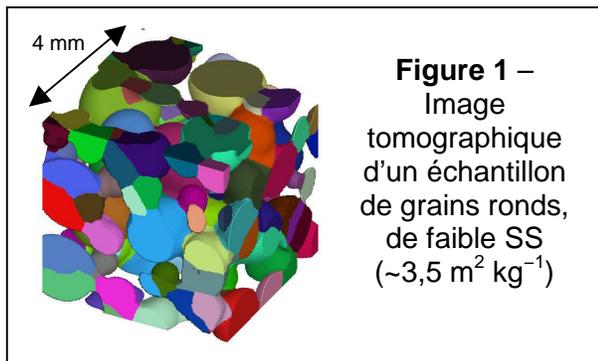


Figure 1 –
Image
tomographique
d'un échantillon
de grains ronds,
de faible SS
($\sim 3,5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$)

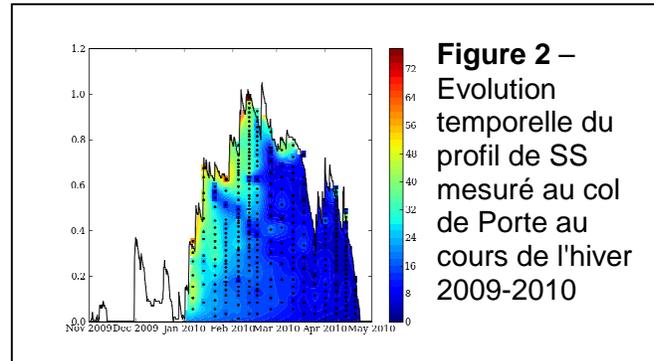


Figure 2 –
Evolution
temporelle du
profil de SS
mesuré au col
de Porte au
cours de l'hiver
2009-2010

Au Col de Porte, les mesures révèlent que la SS évolue au cours du temps, passant de valeurs élevées au moment de la chute à des valeurs plus faibles. Ceci traduit les transformations morphologiques de grains de neige au cours du métamorphisme. Par ailleurs, l'humidification (obtention de grains ronds) conduit à des diminutions spectaculaires de la SS, comme le montrent les profils de SS basse en fin de saison. Ces données sont utiles au développement et à l'évaluation de nouvelles versions du modèle de manteau neigeux Crocus, dans lequel la SS sera une variable pronostique de base, eu égard aux avantages revêtus par cette variable physique. En plus des estimations de SS classiques, l'analyse d'images tomographiques permet d'accéder à des mesures d'aires généralement difficiles à réaliser macroscopiquement, telles la mesure de la *surface spécifique de contact entre les grains*, qui caractérise la taille des liaisons entre les grains de glace constituant la neige et qui joue un rôle clef pour les propriétés mécaniques de ce matériau.

Références

Morin, S., F. Dominé, C. Carmagnola, Y. Lejeune, B. Lesaffre, A. Dufour, J.-M. Willemet, H.-W. Jacobi, A. Hasan, Observation and simulation of the vertical profile of specific surface area throughout the snow season 2009-2010 in a French alpine site, *EOS Trans. AGU, Fall Meet. Suppl.*, Abstract C33D-0563, 2010.

Flin, F., Lesaffre, B., Dufour, A., Gillibert, L., Hasan, A., Rolland du Roscoat, S., Cabanes, S. and Pugliese, P., 2011 : On the Computations of Specific Surface Area and Specific Grain Contact Area from Snow 3D Images, in Furukawa, Y., ed., 'Physics and Chemistry of Ice', Hokkaido University Press, Proceedings of the 12th International Conference on the Physics and Chemistry of Ice held at Sapporo, Japan, 5-10 September 2010, 321-328, in press.

Le Centre d'Etudes de la Neige dispose d'outils d'investigations des propriétés de la neige en laboratoire (chambres froides à St Martin d'Hères et au col de Porte) et en conditions naturelles sur le terrain : sites du col de Porte et du col du lac Blanc. Ce dernier est essentiellement dédié à l'étude du transport de neige par le vent (voir fiche CEN-9).

La chambre froide du site du Laboratoire du Col de Porte, qui a vu son dispositif de production de froid rénové à l'automne 2006, permet d'étudier et de stocker une neige récente prélevée aux abords du Laboratoire qui se situe en Chartreuse à une altitude de 1325 mètres d'altitude (voir Figure 1). En 2007, Météo-France a décidé de lancer la rénovation de la chambre froide de Saint-Martin-d'Hères. La maîtrise d'œuvre a été assurée par le CEN et le cœur du dispositif est un groupe froid standard d'une puissance frigorifique de 19 kW à une température de -45°C . Les premières expérimentations scientifiques ont été réalisées au début de l'année 2011. Les principales caractéristiques de cet équipement sont une température paramétrable entre 0 et -35°C , une régulation très stable et la possibilité unique d'ajuster et de contrôler l'hygrométrie à l'intérieur de la cellule d'expérimentation. Les deux chambres sont équipées de systèmes macrophotographiques pour prise de vue de cristaux de neige (voir Figure 2).



Figure 1 – Vue d'ensemble du site du col de Porte



Figure 2 – équipement macrophotographique dans la chambre froide du col de Porte.

Depuis 1961 le Centre d'Etudes de la Neige collecte au col de Porte des mesures météorologiques et nivologiques. Le site est situé près de Grenoble, dans le massif de la Chartreuse (altitude : 1325m, latitude : $45^{\circ}30'N$, longitude : $5^{\circ}77' E$).

Le site du Col de Porte permet l'acquisition de données nivo-météorologiques de bonne qualité, qui sont indispensables à la construction et l'évaluation de modèles de manteau neigeux quel que soit leur niveau de complexité. Les données horaires sont disponibles depuis 1993. Les données au pas quotidien sont disponibles depuis l'origine : elles constituent une série de référence pour caractériser l'évolution climatique de cette zone.

Le site est également indispensable à d'autres développements en physique de la neige, qu'il s'agisse de capteurs en test ou de réalisation d'expériences sur le terrain ou dans la chambre froide attenante au laboratoire.

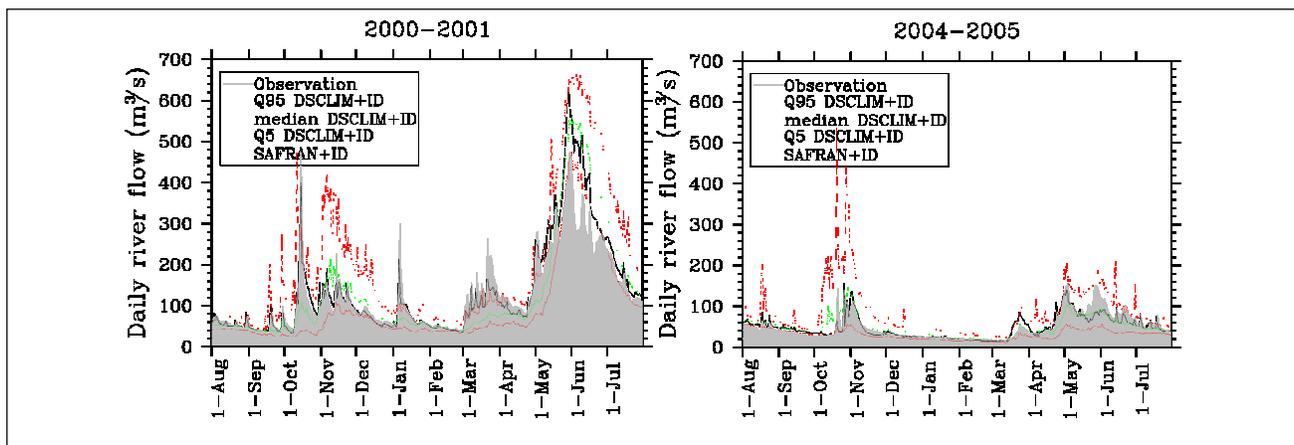
Références

Plus de 30 publications scientifiques ont utilisé les données nivo-météorologiques du col de Porte pour de multiples applications en modélisation de la neige. Une liste non exhaustive est disponible à cette adresse : <http://www.cnrm-game.fr/spip.php?article533>

Les travaux en microstructure de la neige s'appuient fortement sur les installations frigorifiques du CEN.

CEN-6 Incertitudes associées à la modélisation de l'impact du changement climatique sur le régime hydrologique du bassin de la Haute Durance.

Le changement climatique impose de rechercher des stratégies optimales et durables pour gérer au mieux la ressource en eau et les ressources énergétiques associées, en particulier dans le massif alpin. La forte variabilité spatiale des processus hydrologiques en montagne a une influence majeure sur la répartition temporelle des débits en rivière. Pour une étude d'impact du changement climatique, il est donc nécessaire de disposer de scénarios météorologiques futurs adaptés à l'échelle des processus mis en jeu dans le modèle d'impact hydrologique (ISBA-Durance, Lafaysse et al, 2011). Les GCM utilisés pour les projections climatiques n'ayant pas une résolution suffisante face à cette contrainte, il est nécessaire d'utiliser des modèles de descente d'échelle. Trois méthodes statistiques développées au CERFACS (Boé et al, 2006), au LTHE et à EDF/DTG sont utilisées. Pour un jour donné et un scénario de grande échelle donné, ces méthodes proposent une distribution des variables météorologiques à échelle fine. Les scénarios météorologiques générés à partir des circulations de grande échelle réanalysées sur la période 1959-2006 (NCEP) ont été injectés dans le modèle hydrologique. La médiane et les quantiles Q5 et Q95 des débits ainsi obtenus sont représentés ci-dessous, pour deux années distinctes, respectivement en vert et rouge :



Si la dispersion entre les scénarios est relativement importante, le scénario médian est souvent proche des débits simulés en forçant le modèle par les analyses météorologiques locales SAFRAN (noir). La comparaison avec les débits observés (grisé) montre que l'erreur introduite par la descente d'échelle est d'un ordre de grandeur comparable à l'erreur propre du modèle hydrologique. La chaîne de modélisation est capable de représenter la variabilité inter-annuelle des débits, illustrée ci-dessus par deux années respectivement bien et mal enneigées, associées à une onde de fonte plus ou moins importante. Ce résultat est satisfaisant puisque les débits sont simulés uniquement à partir de deux champs de circulation de grande échelle.

L'applicabilité de cette méthode est toutefois soumise à deux hypothèses particulièrement délicates, qu'il nous faut impérativement mettre à l'épreuve avant de générer des scénarios hydrologiques futurs pour ce bassin :

- la stationnarité temporelle du lien d'échelle représenté par les modèles statistiques ;
- la validité des circulations de grande échelle simulés par les modèles climatiques.

Références

Boé et al, 2006 A simple statistical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling, *J. Geophys. Res.* 111

Lafaysse et al, 2011 Influence of spatial discretization, underground water storage, and glacier melt on a physically based hydrological model of the Upper Durance River basin, *J. Hydrol.*

Accepted

CEN-7 Détermination de l'albédo des surfaces enneigées par télédétection et assimilation dans un modèle numérique de neige

Les glaciers tempérés sont extrêmement sensibles aux effets du changement climatique car la modification de leur bilan énergétique affecte en retour leur bilan de masse. Les flux d'énergie sur la surface des glaciers sont régis par de nombreux paramètres tels que l'albédo qui commande le rapport du rayonnement d'onde courte effectivement absorbé par le glacier. Des données télé-détectées, acquises par des capteurs terrestres ou embarqués sur satellite permettent de déterminer l'albédo de surface avec une résolution spatiale et temporelle relativement élevée. Deux méthodes ont été conçues pour mesurer et tracer l'albédo du glacier de Saint Sorlin (Grandes Rousses, France). La première méthode utilise des images numériques de type photographique terrestre prises dans les bandes visibles et proche infra-rouge du spectre électromagnétique solaire. La deuxième méthode emploie des données de réflectivité dans d'autres bandes du spectre acquises par la sonde MODIS à bord du satellite TERRA (fig. 1). Deux algorithmes ont été développés afin de convertir les mesures de réflectivité spectrale en valeur de l'albédo qui est la variable directement utilisable dans le calcul du bilan du glacier. Ceci a exigé de modéliser le comportement bi-directionnel de réflectivité de la glace et de la neige, ainsi que de convertir les données initiales d'albédo spectral à bande étroite en une valeur d'albédo à bande large utilisable pour la modélisation du bilan du glacier (fig. 1).

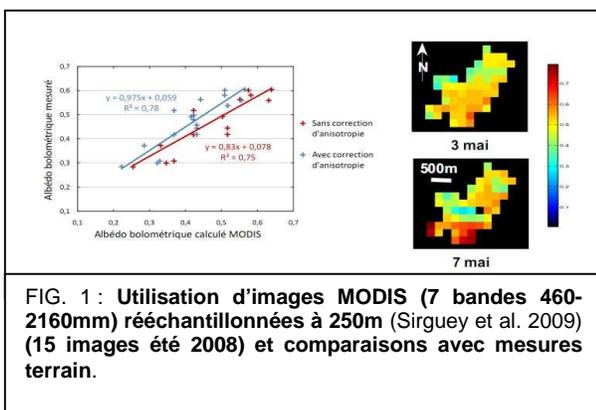


FIG. 1 : Utilisation d'images MODIS (7 bandes 460-2160nm) rééchantillonnées à 250m (Sirguey et al. 2009) (15 images été 2008) et comparaisons avec mesures terrain.

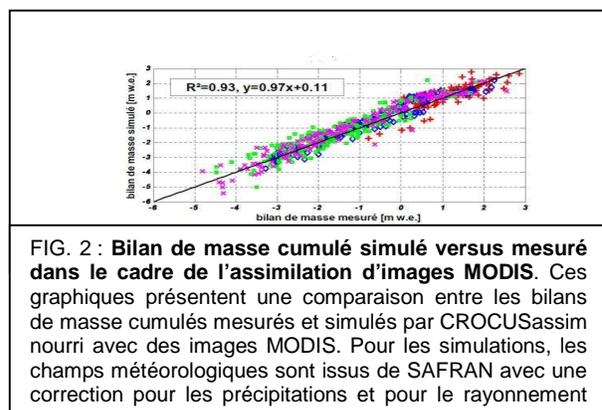


FIG. 2 : Bilan de masse cumulé simulé versus mesuré dans le cadre de l'assimilation d'images MODIS. Ces graphiques présentent une comparaison entre les bilans de masse cumulés mesurés et simulés par CROCUSassim nourri avec des images MODIS. Pour les simulations, les champs météorologiques sont issus de SAFRAN avec une correction pour les précipitations et pour le rayonnement

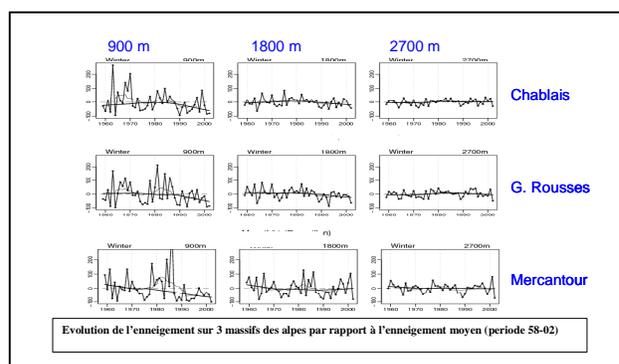
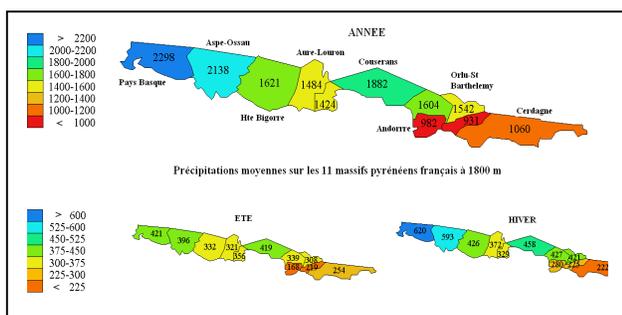
Deux séries chronologiques de mesures d'albédo de surface du glacier de Saint Sorlin ont été calculées couvrant les étés 2008 et 2009. Les cartes de l'albédo ont été validées grâce à des mesures au sol à différents endroits choisis sur le glacier. Ces cartes d'albédo ont été ensuite assimilées dans le modèle CROCUS qui simule le manteau neigeux. On a pu montrer qu'une telle assimilation de valeurs restituées à distance d'albédo permettait d'améliorer significativement la simulation numérique du bilan de masse du glacier. L'évaluation de la méthode et des résultats a été menée grâce à des mesures de type glaciologique du glacier conduit par le SOERE GLACIOCLIM (fig. 2).

Références

Marie DUMONT, 2010. DÉTERMINATION DE L'ALBÉDO DES SURFACES ENNEIGÉES PAR TÉLÉDÉTECTION : Application à la reconstruction du bilan de masse du glacier de Saint Sorlin, Thèse de doctorat de l'Université Paris Est ,Spécialité : Sciences, Ingénierie et Environnement, soutenue le 17 Décembre 2010

CEN-8 45 années de simulation de l'enneigement et des principales conditions météorologiques dans les massifs alpins et pyrénéens.

En France, l'absence de longues séries de données météorologiques et nivologiques mesurées ne permet pas de réaliser une climatologie objective en zone de montagne. Le recours à la modélisation numérique du manteau neigeux est une des solutions pour remédier à ce problème. Le projet ERA40 mené par le CEP a mis à disposition de la communauté scientifique des champs atmosphériques analysés sur une période de 40 ans. Ces données, complétées pour les années plus récentes par des sorties du modèle Arpège de prévision météorologique, ont été partiellement traitées par le CEN sur un domaine couvrant les massifs français Alps et Pyrénéens. Elles ont permis de réaliser une climatologie des conditions météorologiques et de l'enneigement depuis 1958 dans les Alpes et depuis 1990 dans les Pyrénées françaises en utilisant la modélisation développée initialement pour la prévision opérationnelle du risque d'avalanches. Cet outil, composé d'un modèle d'analyse météorologique Safran et d'un modèle déterminisme de neige Crocus, simule à l'échelle d'un massif montagneux et par tranches d'altitudes l'évolution horaire du manteaux neigeux jour après jour tout au long d'une année.



Les deux illustrations ci dessus montrent la richesse des résultats que l'on peut obtenir que ce soit sur les paramètres météorologiques : température de l'air, précipitations, vent... ou les paramètres nivologiques : hauteur de neige au sol, durée d'enneigement..... en moyenne, variabilité inter-annuelle, tendance....par massif ou groupe de massifs et par altitude.

Par exemple, la variabilité spatiale des précipitations annuelles est très importante aussi bien dans les Alpes avec à 1800 m environ 2000 mm dans les massifs des Aravis, du Chablais et de la Chartreuse et moins de 850 mm dans le Queyras que dans les Pyrénées avec 2200 mm dans le Pays Basque et la moitié moins à l'Est en Cerdagne ou Capcir-Puymorens.

Quant à l'enneigement, il est caractérisé par une très grande variabilité inter annuelle. Depuis le milieu de la décennie 80, tous les paramètres qui le caractérisent hors couvert forestier à savoir hauteur de neige ou durée de l'enneigement subissent une baisse remarquable de 50 à 80% à basse altitude (< 1200m), plus faible au fur et à mesure où nous prenons de l'altitude et devenant quasi nulle à partir de 2400 m. Cette tendance sur l'enneigement est très corrélée à l'évolution des températures de l'air qui, après un point bas dans la décennie 1970, ont augmenté de 0,5 à 2 degrés selon les massifs, augmentation plus faible à l'Est des Alpes et des Pyrénées.

Références

Durand et al., 2009a, Reanalysis of 44 year of climate in the French Alps (1958–2002): methodology, model validation, climatology, and trends for air temperature and precipitation, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol 48, Issue 3. pp 429-449.

Durand et al., 2009b, Reanalysis of 47 Years of Climate in the French Alps (1958–2005): Climatology and Trends for Snow Cover, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol 48, Issue 12. Pp. 2487–2512.

Malou N.A. Maris, 2009, Results of 50 years of climate reanalysis in the French Pyrenees (1958-2008) using the SAFRAN and CROCUS models, proceeding of ISSW 2009, Davos, Pp 219-223

CEN-9 Étude sur les paramètres nivo-météorologiques représentatifs des évènements de transport de neige par le vent à échelle locale.

L'observation, l'analyse et la compréhension des effets du vent sur la neige est un sujet majeur d'études pour le CEN. Ce phénomène a une grande importance pour la stabilité du manteau neigeux par son action de redistribution de grandes quantités de neige qui modifie localement le risque de déclenchement spontané. Le vent est aussi une des principales causes de formation de plaques à l'origine de la plupart des déclenchements provoqués d'avalanches. D'autres effets comme les congères, les corniches, l'interaction entre le fluide et la surface ainsi que la modification des grains sont aussi étudiés. Le CEN poursuit donc son action d'observation des effets des différents modes de transport sur le site expérimental de l'Alpe d'Huez en utilisant différents types de capteurs incluant des mesures à distance. En parallèle, différents efforts de modélisation numérique tant pour le vent à échelle très fine que pour la modification induite des caractéristiques du manteau neigeux et sa redistribution sont en cours de développement. Le but visé est une modélisation opérationnelle des effets du transport éolien de la neige à une échelle kilométrique sur les principaux massifs montagneux français.



Figure 1 : détail des accumulations dues au vent au Col du Lac Blanc (2 700m).



Figure 2 : suivi des paramètres météo sur site et identification des périodes à étudier.

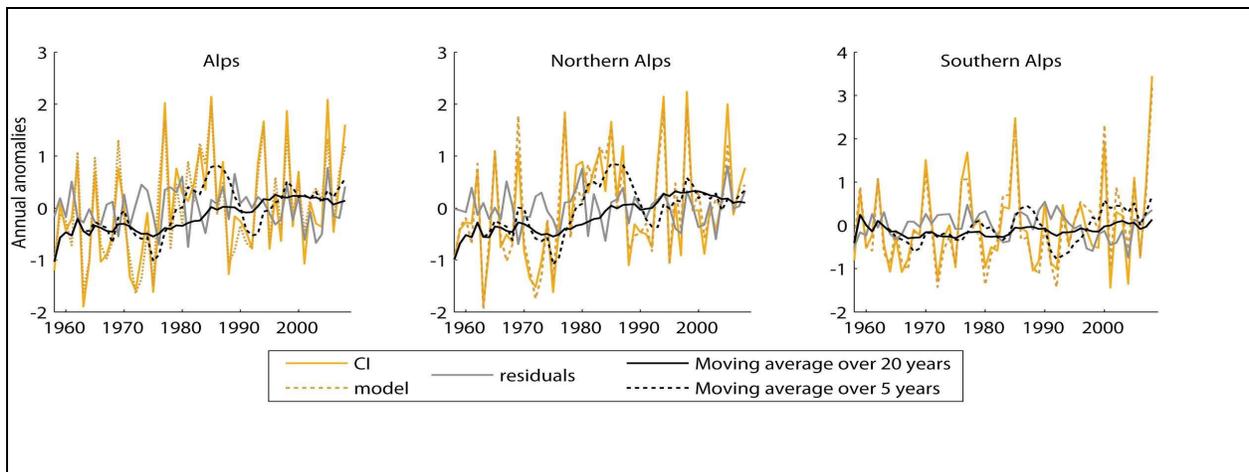
Le site du Col du Lac Blanc se comporte comme une soufflerie naturelle (fig. 1) où les vents sont canalisés selon un axe nord-sud, facilitant ainsi la validation des différents modèles développés sur cette thématique. De nombreux épisodes de transport de neige par le vent (145 sur les 10 dernières années) ont été observés et documentés sur ce site expérimental (fig. 2). Des périodes d'observations intensives permettent de compléter ce dispositif par des mesures spécifiques : profils verticaux de densité de neige déplacée et du vent à échelle fine, suivi précis de la répartition des précipitations, observations de la structure du manteau neigeux et des caractéristiques des particules de neige susceptibles d'être déplacées. Grâce aux séries de mesures effectuées au Col du Lac Blanc et l'examen minutieux des événements de transport, une généralisation 3D de la modélisation spécifique a été développée. Elle permet de simuler de manière réaliste les transferts horizontaux et verticaux de masse de neige sur un domaine montagneux restreint (maille de 50m). Le développement et la poursuite de cette série de modèles sont en cours actuellement dans le contexte d'un couplage complet entre un modèle météorologique complexe (Meso-NH) et une modélisation fine des processus physiques.

Références

Durand, Y., Guyomarc'h, G., Mérindol, L., & J.G. Corripio (2005) - *Improvement of a numerical snow drift model and field validation*. Cold Regions Science and Technology, **43(1-2)**, 93-103
Guyomarc'h G. & Y. Durand (2010) - *Key parameters for local drifting snow events*. International Snow Science Workshop (ISSW 2010), Squaw Valley (CA - USA)
Vionnet V., E. Martin, V. Masson, E. Brun, Y. Durand, G. Guyomarc'h & C. Lac (2011) – *Simulations of snow-drift events in alpine terrain using a meso-scale atmospheric model*. IUGG 2011, Melbourne 2011/6/27

CEN-10 Etude climatologique de l'activité avalancheuse naturelle au cours des 50 dernières années sur les Alpes françaises

Les fluctuations récentes du climat montagnard sont assez bien documentées en Europe et en Amérique du Nord. Pour les Alpes françaises, elles ont été étudiées^{1,2} en intégrant l'ensemble des données disponibles la chaîne SCM depuis 1958, rendant compte de la diminution de l'enneigement à basse et moyenne altitude, à la fois en termes de cumul et de durée, mais aussi de l'augmentation de la variabilité, notamment des températures hivernales. En revanche, la réponse des avalanches aux fluctuations climatiques reste peu documentée. Cette étude s'intéresse à l'évolution de l'activité avalancheuse dans les Alpes françaises durant les dernières décennies et à ses liens avec le climat. Les travaux se basent sur une série d'observations exceptionnelle, l'Enquête Permanente sur les Avalanches³ (EPA, Cemagref UR ETNA), et sur des données nivo-météorologiques issues de la chaîne de modèles Safran-Crocus-Mepra (SCM, Météo-France). Un indice composite IC d'activité avalancheuse a été construit sur la base des observations de l'EPA et de l'indice modélisé MEpra. Afin de déterminer les variables nivo-météorologiques les plus représentatives de l'activité avalancheuse, une régression « stepwise » a été réalisée à partir des données annuelles normalisées sur 51 ans. Cette technique permet de choisir les variables à inclure dans un modèle linéaire en sélectionnant ou en éliminant à chaque pas une des variables explicatives selon sa significativité statistique.



Le modèle de régression le plus efficace ($R^2=0,88$) est celui privilégiant la température et les variables Crocus d'exposition sud. Il représente parfaitement la variabilité inter-annuelle de la variable et permet de détecter les années exceptionnellement fortes en termes d'activité avalancheuse, répertoriées par le Centre d'Etude de la Neige⁴. En appliquant le test de Spearman, on détecte une légère non stationnarité du modèle IC à l'échelle des Alpes et des Alpes du Nord. Elle est due à une augmentation très significative des températures maximales à 3000m notamment dans les Alpes du Nord et de l'épaisseur de neige humide à 3000m versant Nord (lien de cause à effet). Le signal le plus marquant dégagé par la moyenne mobile sur 5 ans semble tout de même bien être la rupture/inflexion au début des années 1980 présente dans la majorité des séries, en hiver et au printemps, déjà détectée pour les altitudes d'arrêt des avalanches (diminution de 1977 à 2006 pour les événements avalancheux de forte amplitude - caractérisés par des altitudes d'arrêt basses) ou pour les variables nivo-météorologiques (augmentation des températures et du rapport entre les précipitations pluvieuses et neigeuses pouvant expliquer la diminution de la couverture neigeuse)^{1,2,3}.

L'étude se poursuit avec une analyse spatiale et temporelle plus fine des principaux cycles avalancheux à l'échelle de la journée et du massif et de leur caractérisation nivo-météorologique.

Références

¹ Durand et al., 2009a, Reanalysis of 44 year of climate in the French Alps (1958–2002): methodology, model validation, climatology, and trends for air temperature and precipitation, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol 48, Issue 3. pp 429-449.

² Durand et al., 2009b, Reanalysis of 47 Years of Climate in the French Alps (1958–2005): Climatology and Trends for Snow Cover, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Vol 48, Issue 12. Pp. 2487–2512.

³ Eckert et al, 2010, Assessing the response of snow avalanche runout altitudes to climate fluctuations using hierarchical modeling: application to 61 winters of data in France, *Journal of Climate*. 23, pp 3157-3180.

⁴ Goetz et al., 2008, Aperçu nivo-climatologique des massifs des Alpes, de la Corse et des Pyrénées : situations avalancheuses remarquables, Note de travail du Centre d'Etude de la Neige, n°26.

Le projet OPTIMISM a débuté en septembre 2009 et est à l'initiative de chercheurs du laboratoire LOCEAN (université de Jussieu à Paris). Prenant en compte la sensibilité particulière des régions arctiques au réchauffement climatique et le fait que la glace de mer est non seulement un indicateur sur l'évolution du réchauffement climatique mais aussi un des principaux acteurs de la machine climatique, il a été décidé de concevoir un dispositif d'observation autonome capable de transmettre en temps réel l'épaisseur de la glace de mer arctique ainsi qu'un certain nombre de paramètres de flux échangés entre l'eau, la glace, l'atmosphère et qui régissent le bilan de masse de cette glace. Ce dispositif est construit sur la base d'un flotteur cylindrique instrumenté conçu lors de précédentes études par le LOCEAN et dénommé Ice-T. Dans le cadre du projet, le flotteur est chargé de supporter une partie aérienne constituée d'un mât de mesures météorologiques. Les difficultés sont nombreuses : problèmes de résistance mécanique de la structure, capacité du dispositif à assurer une autonomie électrique durant les longs mois de dérive au milieu des glaces, stabilité de l'ensemble durant les phases de flottaison, problèmes de givrage éventuel des capteurs... Le Centre d'Etudes de la Neige est partenaire de ce projet et intervient durant certaines phases de tests de la station de mesures.



Figure 1 : Site de Ny-Alesund



Figure 2 : Site du Col de Porte

Durant l'hiver 2009-2010, Le mât météo a été testé sur le site du Col du Lac Blanc (domaine skiable de l'Alpe d'Huez, 2600 m d'altitude). Cette première étape a permis de s'assurer de la bonne résistance de la structure et du bon fonctionnement des capteurs. Au printemps 2010, le dispositif de mesures a été transporté sur la base scientifique de Ny-Alesund sur l'île de Spitzberg (Figure 1). Durant cette campagne, le CEN a été chargé d'effectuer des mesures complémentaires de température de surface de la neige à l'aide d'un thermomètre infrarouge et de sondes platines. Ces informations ont permis de valider les mesures de températures de surface utilisées dans l'estimation de flux Bulk et obtenues à partir d'un capteur radiatif présent sur la station météorologique. En décembre 2010, le flotteur Ice-T a été installé sur le site du Laboratoire du Col de Porte (Figure 2). Des sondes de températures placées sous l'enveloppe externe du flotteur cylindrique seront chargées de fournir un profil vertical de température dans l'eau, la glace, la neige. Les mesures effectuées dans la neige au Col de Porte, doivent être comparées à celles réalisées habituellement par le CEN dans le parc à instruments du Laboratoire.

Références

R. Loiseil, L. Eymard, N. Amarouche, J.M. Panel, A. Lourenço, A. Matulka, A. Weill, F. Vivier, M. Dechambre, A. Viola, V. Vitale, S. Argenti, H. Kupfer. « BEAR, une station de mesure pour l'Océan Arctique. (sous-titre BEAR, un système de mesure du bilan d'énergie sur une bouée océanographique autonome, projet ANR OPTIMISM pour l'étude du bilan d'énergie à la surface de l'océan arctique) .La Météorologie (ISSN : 0026-1181). Sous presse.