

SUIVI DE L'ENNEIGEMENT D'UN SITE DE MONTAGNE PAR TRAITEMENT DE PHOTOS NUMERIQUES

PROGRAMME DE RECHERCHE 2002

FINANCE PAR LE

CONSEIL GENERAL DE L'ISERE

GILBERT GUYOMARC'H

METEO-FRANCE – CNRM CENTRE D'ÉTUDES DE LA NEIGE

1441 RUE DE LA PISCINE

38406 ST MARTIN D'HERES CEDEX

04 76 63 79 18

gilbert.guyomarch@meteo.fr

Fiche de synthèse

1 - Titre du projet : **Suivi de l'enneigement d'un site de montagne par traitement de photos numériques.**

2 - Coordonnateur du projet :

Nom : Guyomarc'h **Prénom :** Gilbert

Qualité : responsable du site de mesures du "Col du Lac Blanc"

Adresse : 1441 rue de la piscine 38406 Saint Martin d'Hères Cedex

Téléphone : 04 76 63 79 18 **Télécopie :** 04 76 51 53 46 **E-mail :**

gilbert.guyomarch@meteo.fr

· **Laboratoire** (coordonnées, nom du directeur) :
Centre d'Études de la Neige, Eric Martin

· **Organisme gestionnaire de la subvention :**
Météo-France

3 - Liste des personnes et laboratoires collaborant au projet :

- **Météo-France** – Centre d'Études de la Neige (Cen)

Delphine Charlieu

Yves Durand

Gilbert Guyomarc'h

Dominique Lecorps

Laurent Mérindol

Philippe Puglièse

Javier G Corripio (visiteur scientifique *post-doc* de novembre 2002 à novembre

2003

4 - Financement du projet :

- Montant du financement demandé : 9 500 €
- Montant obtenu : 4 000 €

- Coût total du projet (TTC) : 23 750 €

- Autre financements : Météo-France (frais de personnels et visiteur scientifique)

- Organismes Sollicités Montants Attribués (TTC) : néant

5 - Résumé du projet : La modélisation numérique de la répartition de la neige sur un site de haute-montagne soumis aux effets du vent nécessite une validation spécifique qui couvre une grande surface horizontale, et une instrumentation adaptée. Sur le site expérimental du "Col du Lac Blanc" dédié à l'étude du phénomène de transport de neige dû au vent, des profils de perches à neige et des capteurs spécifiques ont été installés grâce à des financements précédents de la région Rhône Alpes et du département de l'Isère. L'objectif du projet est d'utiliser, en complément des observations régulières, une méthode simple pour déterminer sur le site les zones d'érosion et d'accumulation de neige grâce à un suivi photographique et au traitement de ces images numériques, afin de vérifier les résultats de la modélisation. Une saison de faisabilité du projet a déjà été effectuée en 2001-2002. La modélisation numérique du phénomène de *snowdrift* permet d'améliorer la prise en compte du risque de déclenchement accidentel d'avalanches dans les outils opérationnels de Prévision du Risque d'Avalanches, notamment à l'échelle locale.

SUIVI DE L'ENNEIGEMENT D'UN SITE DE MONTAGNE PAR TRAITEMENT DE PHOTOS NUMERIQUES

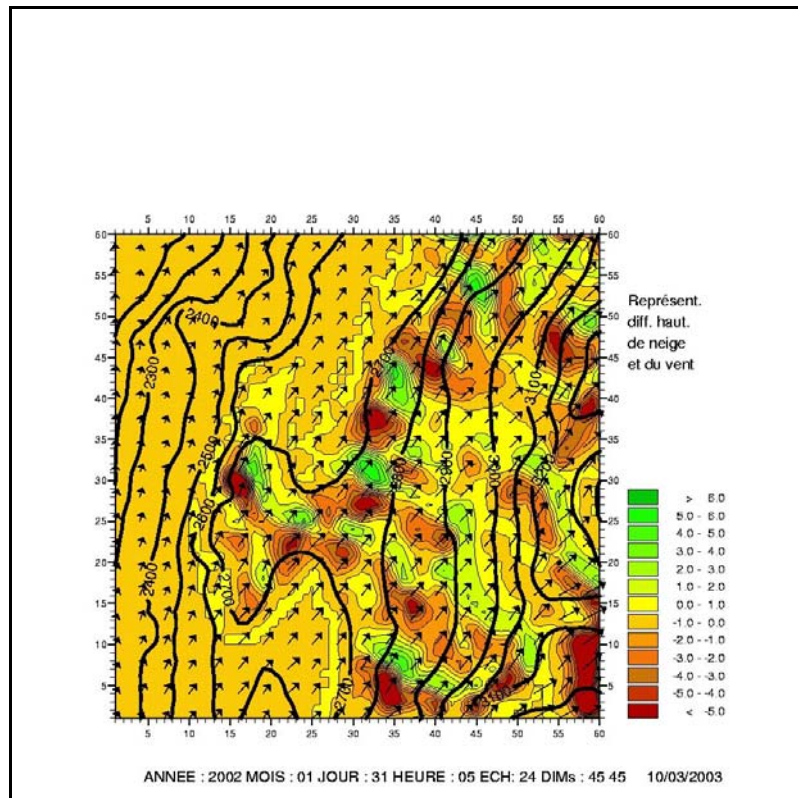
1 - Contexte général du projet:

L'amélioration sensible de la prise en compte du risque accidentel de déclenchement d'avalanches dans la prévision opérationnelle nécessite une meilleure connaissance des effets du vent sur la répartition du manteau neigeux et sur sa stabilité. De plus, la nécessité de pouvoir disposer d'outils d'aide à la décision en matière d'aménagement et de gestion ponctuelle du risque, amène à développer une approche numérique du transport de neige par le vent. La disponibilité d'un outil opérationnel permettant de suivre et de prévoir l'accumulation de la neige dans des zones soumises au transport de neige se heurte à notre connaissance limitée sur la répartition du vent à échelle fine. Les développements récents en matière de modèles météorologiques à échelle fine et de simulation numérique du manteau neigeux, nous ont conduit à étudier une simulation numérique du transport de neige par le vent et de la répartition du manteau neigeux à échelle fine sur un site instrumenté.

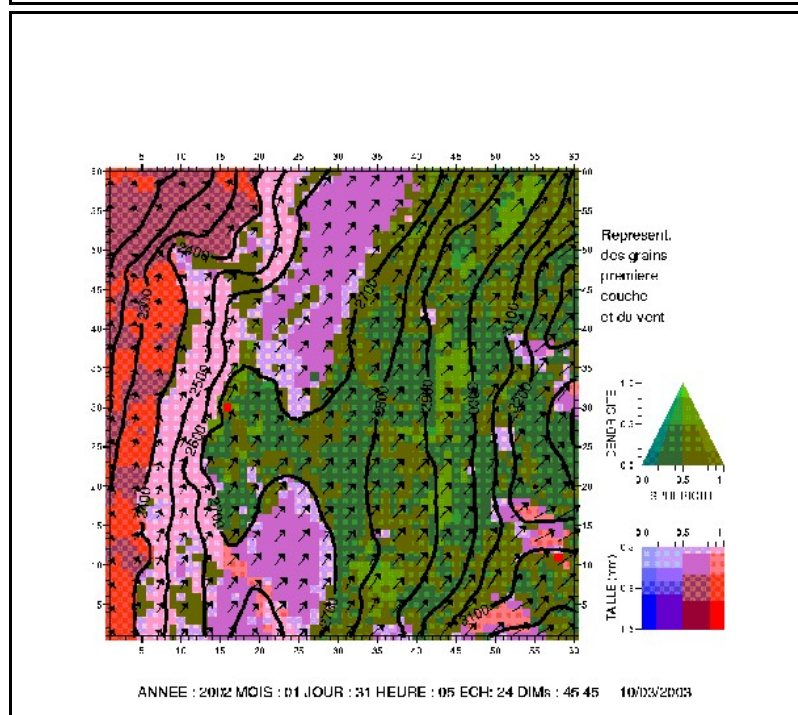
Ce travail initié dans le cadre de plusieurs projets financés par des contrats de plan État – région Rhône-Alpes est poursuivi par le Centre d'Études de la Neige (CEN) de Météo-France, en collaboration, pour certains aspects avec la division Etna (Érosion Torrentielle, Neige et Avalanches) du Cemagref. Ainsi, le site expérimental (Col du Lac Blanc, 2 700 m dans le massif des Grandes Rousses) a été équipé grâce au concours financier de la région Rhône-Alpes, du Pôle Grenoblois et du Conseil Général de l'Isère soit pour des équipements et capteurs, soit pour des études.

Depuis quelques années, plusieurs programmes d'études se sont succédés sur le site du Col du Lac Blanc. Tous avaient comme point commun l'étude des effets du transport de neige par le vent sur la répartition du manteau neigeux et le risque d'avalanches, essentiellement dues à des déclenchements provoqués accidentellement. Ces projets de recherche ont permis de faire progresser la connaissance sur les mécanismes de transport, les seuils de vent en fonction du type de neige à la surface du manteau neigeux; des modèles ont été développés et sont maintenant opérationnels.

Les développements en cours depuis trois années au Cen portent sur l'intégration de ces nouvelles connaissances dans la modélisation numérique du manteau neigeux et de sa répartition. Les difficultés rencontrées concernent principalement l'échelle très fine (quelques centaines de mètres) de ces phénomènes. Cette échelle de travail impose de représenter aussi finement que possible la répartition du vent et l'état complet du couvert neigeux dans un environnement montagneux réaliste. Météo-France a développé plusieurs outils numériques qui sont actuellement en cours de validation. Ces nouveaux modules complètent les applications opérationnelles de plus grande échelle, dans lesquelles les effets de transport sont actuellement peu intégrés. Ils permettent de simuler les principales zones d'érosion ou d'accumulation sur un manteau neigeux soumis à un phénomène de transport éolien (voir figure 1).



a)



b)

Figure 1 : résultats Sytron2 : Champ de neige déduit des profils de la chaîne SCM pour le 31-01-2002, puis soumis, pendant plusieurs heures, aux effets du vent (Samver) représenté par les flèches noires. Le graphique (a) illustre les variations de hauteur de neige pendant l'épisode de transport et le graphique (b) montre la forme finale des grains de neige de la première couche du manteau neigeux à la fin de cet événement. On peut ainsi voir les transformations du manteau neigeux, dues aux différents opérateurs de transport, en fonction des expositions.

L'objectif, à terme, reste toujours l'amélioration des outils pour la prévision du risque d'avalanches. Ils pourront également être intégrés dans des outils de "prévision locale" accessibles par les services de piste par exemple.

2 – Objectif du projet :

L'objectif du projet proposé est d'utiliser une technique basée sur le traitement de photographies terrestres numériques pour vérifier les résultats de la modélisation de la répartition du manteau neigeux soumis aux effets du vent. Il s'agit de pouvoir estimer et suivre l'évolution des zones d'érosion et d'accumulation de neige due à l'effet du vent sur le site expérimental du Lac Blanc (Alpe d'Huez – 2 700 m) sur lequel des mesures régulières sont effectuées. Ce suivi des conditions d'enneigement du site contribuera à la validation des résultats de la modélisation 2D de la répartition du manteau neigeux sur un domaine limité, en utilisant des méthodes simples et peu onéreuses. En effet, le suivi régulier de l'enneigement, en utilisant des profils de perches à neige, présente des limites évidentes. Cette méthode utilisée jusqu'à présent permettait de valider les premières modélisations 1D, mais se révèle insuffisante pour appréhender la répartition du manteau neigeux après chaque épisode neigeux accompagné de vent, ou après un épisode de vent fort.

Ces événements de neige déplacée par le vent constituent une des préoccupations des gestionnaires des pistes et des responsables de la sécurité dans les stations de sport d'hiver. Les résultats de ce travail s'intégreront donc naturellement dans les futurs outils réclamés par les services des pistes et de la sécurité des domaines skiables (réflexion commission "Prévision du Risque d'Avalanches" de l'Anena). En effet, la prise en compte des phénomènes locaux (d'accumulation de neige par exemple) nécessite de pratiquer une diminution de l'échelle de travail (échelle d'un versant, d'un couloir, ...) que les modèles opérationnels actuels ne permettent pas. C'est cette voie qui est suivie pour les nouveaux développements des modèles **Sytron1** (1D) et **Sytron2** (2D) (voir bibliographie).

L'idée de départ pour reconnaître les zones d'érosion et d'accumulation à partir des images numériques repose sur la détection des contours, l'analyse des textures : la neige n'a pas le même aspect en surface selon le type des grains qui ont résisté à l'érosion ou qui se sont accumulés, l'albédo est différent, ... On pourra également faire une liaison avec les épaisseurs de neige relevées aux perches le long du profil horizontal à chaque prise de vues.

3 - Réalisation du projet :

3.1 Sur le terrain :

Les photos ont été prises régulièrement au moins une fois par semaine avec un appareil Nikon D100 équipé d'un zoom Sigma (24-70 mm, f 2.8). Nous nous sommes efforcés de suivre au plus près les événements de déplacement de neige dus au vent. Le service des pistes de L'Alpe d'Huez (SATA) a également apporté sa contribution en essayant de réaliser une photo régulièrement depuis le Pic Blanc avec un autre appareil numérique que nous avons fourni.

Toutes les photos ont été prises avec une distance focale de 24 mm.

Pour la saison 2002-2003, nous disposons des photos numériques pour 17 journées allant du 18 novembre 2002 au 15 mai 2003, plus quelques photos prises ponctuellement par les pisteurs de la Sata.

3.2 Technique utilisée :

Pour suivre les changements du manteau neigeux, nous avons pris des photographies de différents points permettant une vision au-dessus du site d'étude. Une première phase de "faisabilité" avait été réalisée pendant la saison 2001-2002. Cela a permis notamment de revoir les points de prise de vue (voir figure 2) : suppression des doublons et ajout d'un point plus lointain (Pic Blanc 3 300 m).

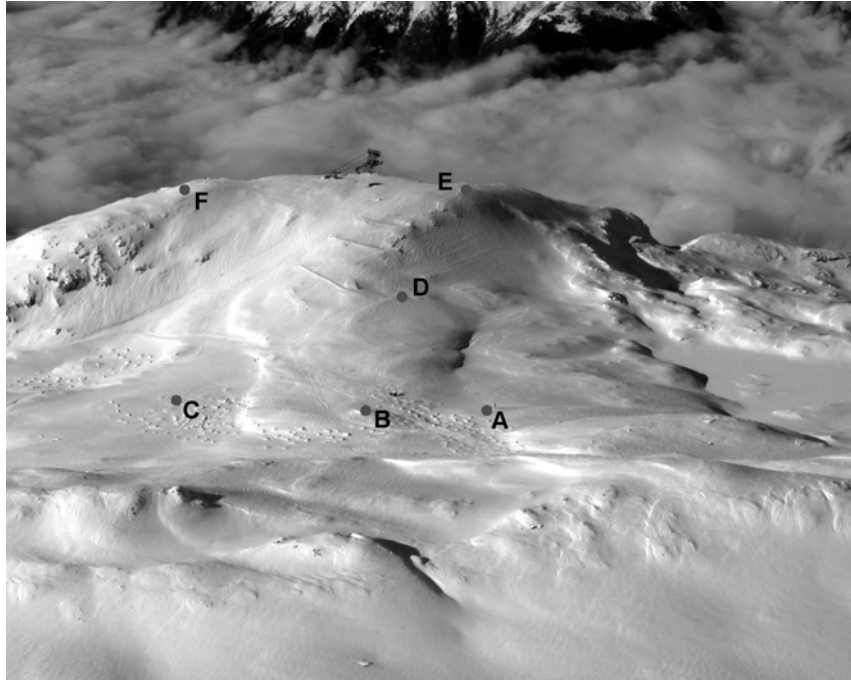


Figure 2 : localisation des 6 points de vue autour du Col du Lac Blanc les plus proches photographiés du Pic Blanc.

Ces photos ont été prises avec un appareil numérique de bonne qualité permettant d'enregistrer des images de 6 millions de pixels. Ces photos sont ensuite référencées géographiquement grâce à un modèle numérique de terrain (Mnt) en utilisant une procédure décrite par J. Corripio (thèse Corripio-2002). Pour résumer, cette technique consiste à créer une image virtuelle du Mnt qui est ensuite mise à l'échelle de la photographie afin d'établir une fonction de transfert entre les pixels de la photo et les points de grille du Mnt. Cela permet de préciser la position exacte des pixels dans l'image oblique. Le procédé de "géo-référencement" consiste en une transformation appliquée au Mnt de manière à ce que chacun des points de grille corresponde à un système de coordonnées dont l'origine se trouve à la position de la prise de vue. Ensuite une transformation est réalisée dans l'axe de la prise de vue, en fonction de la focale utilisée. Cela résulte en un ensemble de points en 3D correspondant aux points de grille du Mnt tels qu'ils sont "vus" par l'appareil photo. Cette dernière transformation est alors projetée en 2D, représentant la surface enregistrée par l'appareil photo. Ce procédé permet une comparaison directe de l'image et de la projection en perspective du Mnt. Si le résultat est correct, les pixels de l'image sont affectés aux valeurs x,y,z des points de grille correspondants du Mnt (voir figure 3).

Des points de contrôle ont été vérifiés par GPS (non différentiel, précision d'env. 15m) sur le terrain. Cela permet de corriger les erreurs et incertitudes sur la position de l'appareil photo et de la cible visée (point central de l'image). L'utilisation d'un GPS différentiel permettrait d'améliorer grandement le processus en réduisant les erreurs de positionnement des points de référence. D'autres erreurs ont également été trouvées, notamment des différences concernant la distance focale entre les spécifications du constructeur et celles réellement mesurées, de plus quelques erreurs de distorsion ont

été notées sur les photos. Mais cette dernière erreur est moins pénalisante car plus petite que la résolution de 45 m du Mnt utilisé par le modèle.

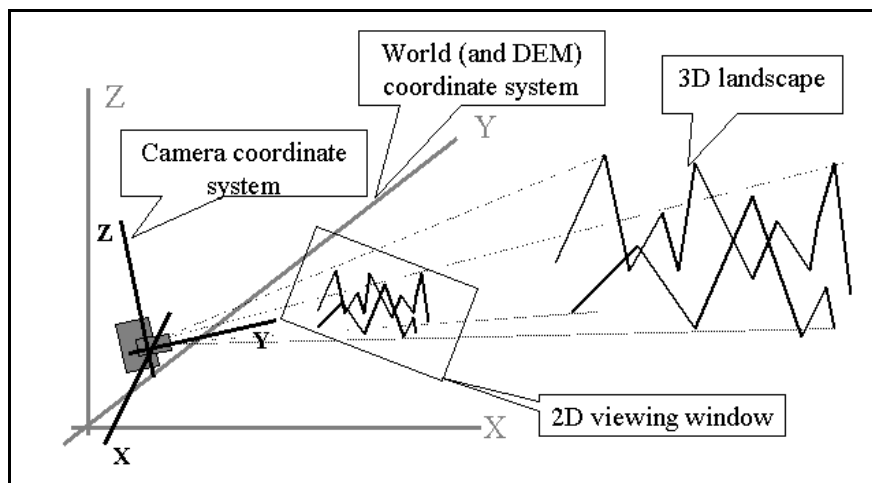


Figure 3 : Processus de géo-référencement. Les coordonnées en 3D du paysage (Mnt) sont transformées dans le système de référence de l'appareil phot et ensuite projetées sur une fenêtre correspondant à ce que perçoit le capteur CCD.

3.3 Albédo déduit des photographies :

La lumière réfléchiée par un point de la zone photographiée et enregistrée par l'appareil photo dépend à la fois des propriétés de réflectivité de la surface (albédo) et de la quantité de lumière incidente arrivant sur la surface. L'éclairage dépend de multiples paramètres tels que : la position du soleil, la transmissivité de l'atmosphère et les rayonnements réfléchis par les pentes environnantes. Ainsi, si nous savons calculer tous ces paramètres, il devient possible d'en déduire les variations de réflectivité dues uniquement à la variation de l'albédo de surface.

Un appareil photo numérique ne délivre pas d'information radio-métrique précise, néanmoins, si nous connaissons la réponse du capteur photographique, nous pouvons relier les variations relatives de réflectivité de chaque pixel aux variations d'albédo après corrections des différences de lumière incidente. La réponse du capteur est habituellement linéaire à l'intérieur d'une gamme d'expositions et devient rapidement inexistante pour les zones sous ou sur exposées. La sensibilité du capteur de l'appareil a été estimée en photographiant une carte d'échelle de gris donnant des valeurs de réflectivité connues, dans une gamme de 5 à 95% de réflectivité. Pour estimer l'albédo relatif, la carte des réflectivités géo-référencées est normalisée en fonction du flux de rayonnement incident en utilisant notamment la constante de rayonnement solaire, les paramètres de l'orbite terrestre, la fonction de transmissivité de l'atmosphère, ... (voir détails dans Corripio et al., 2003). Un exemple de résultat de cette normalisation pour une image du Col du Lac blanc (18 février 2003) est présentée figure 3-a.

Partant de la constatation que les différences d'albédo pour la neige sont plus sensibles dans le proche infra-rouge que dans le visible, nous avons réalisé quelques essais de prise de vue en utilisant un filtre infra-rouge. Nous n'avons, malheureusement pas obtenu du fabricant la réponse exacte du capteur dans cette gamme de longueur d'onde, cette information étant considérée comme confidentielle. Mais nos essais ont montré que le capteur est sensible jusqu'à une longueur d'onde de 1050 nm, cependant la courbe exacte de réponse est inconnue. Pour cette raison, une estimation grossière de l'erreur pour le calcul de l'albédo pourrait s'élever à 4 à 5 % pour les plus mauvais scénarios. L'estimation est faite en utilisant un modèle de transfert radiatif pour calculer l'énergie par bande spectrale du rayonnement solaire incident, prenant en compte les incertitudes sur la courbe de réponse de l'appareil photo. Des mesures complémentaires de radiation dans les mêmes gammes de longueur d'ondes ont été faites sur le terrain en différents

points de la zone expérimentale. A cette altitude et durant les mois d'hiver, nous rencontrons rarement des différences importantes de type de grains en surface, sauf lorsque des croûtes de radiation, dues à un rayonnement solaire intense, sont observées en surface.

Des problèmes supplémentaires sont apparus, à cause de l'anisotropie de la réflectivité de la neige principalement due à l'angle d'incidence de la prise de vue terrestre. Cette anisotropie dépend de la taille et du type des grains de neige et parce que la topographie de plus petite échelle de notre grille joue un rôle important dans la variation de la réflectivité de surface. L'approche la plus sûre est de masquer les zones de très faible lumière ou angle de vue. Des travaux récents de Warren et al. (1998) ont permis de prendre en compte ces effets dans les calculs d'albédo.

3.4 Albédo déduit de la modélisation :

Les sorties de Sytron2 utilisées pour la validation sont des fichiers de valeurs de variation d'épaisseur de neige, de caractéristiques morphologiques des grains de neige (dendricité et sphéricité) et de tailles des grains de neige. Ces valeurs sont calculées à chaque point de grille du Mnt. L'albédo est alors estimé, en utilisant des processus décrits par Brun et al. (1992) et basés sur Warren (1982) et Sergent et al. (1993,1998), comme une fonction de la "taille optique" des grains de neige. L'âge de la neige est également pris en compte pour ce calcul, ce qui peut devenir essentiel dans des épisodes de transport lorsque des strates de neige ancienne reviennent à la surface à la suite de l'érosion des couches récentes.

3.5 Modèle numérique de terrain :

Les calculs utilisés pour le modèle et le géo-référencement des photographies nécessitent l'utilisation d'un Mnt de grande résolution et sont donc limités par la précision des données disponibles. Pour ce travail, nous avons utilisé un Mnt d'une résolution de 2 sec d'arc en latitude et de 1,5 sec d'arc en longitude (acheté à l'IGN). Pour simplifier l'utilisation du Mnt et le processus de géo-référencement, une grille régulière de 45 m de côté a été interpolée à partir du Mnt original. De plus, pour pouvoir utiliser des mesures précédentes les coordonnées géographiques d'origine (latitude et longitude en deg.) ont été transformées en Lambert III (logiciel disponible sur le site de l'IGN).

Afin de maximiser les informations extraites des photographies, deux Mnt supplémentaires ont été interpolés à partir de l'original à des résolutions de 5m et 1m. Cela a été fait simplement pour cartographier des pixels supplémentaires de la photo à l'intérieur de la grille d'origine, en sachant que nous restons naturellement à l'intérieur des limites du Mnt d'origine et que nous ne pouvons pas extraire des informations de relief supplémentaires.

4 – Comparaison des résultats et discussion :

Deux situations sont présentées, la première présentant un transport modéré à faible sur une courte période (18 février 2003), la deuxième après un épisode intense de transport de neige (5 avril 2003). Les méthodes de comparaison sont assez différentes.

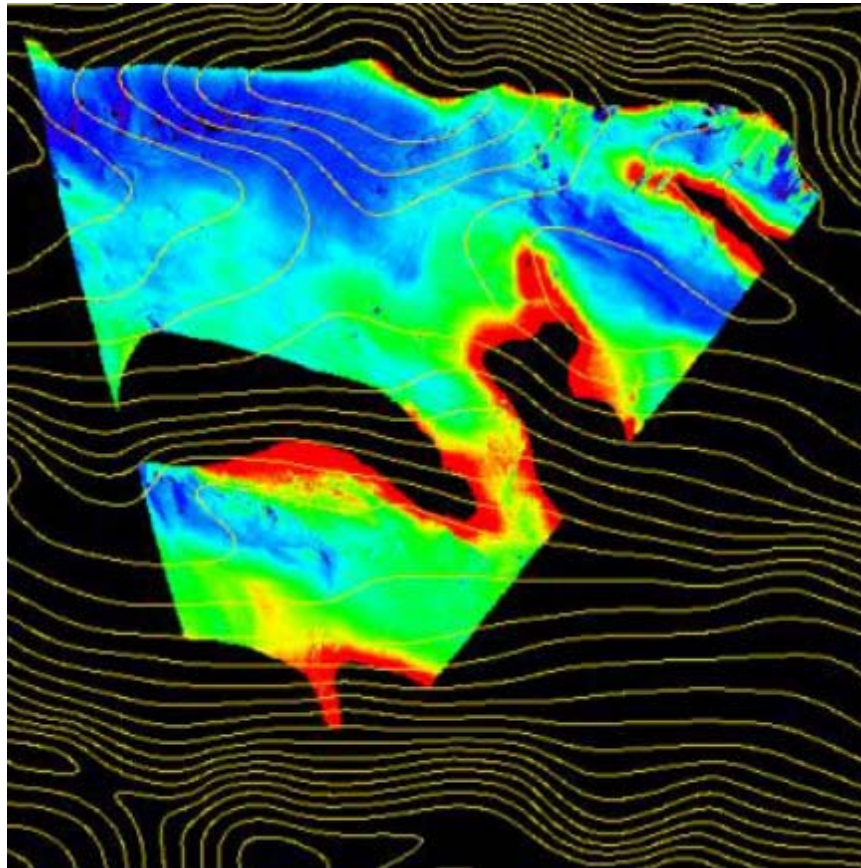
4.1 Période du 18 février 2003:

La figure 3 montre la comparaison après traitement entre les albédos relatifs déduits de la photographie prise du Pic Blanc (3 300 m d'altitude) et ceux déduits de la modélisation Sytron2 pour la même zone. La forme triangulaire de la figure est due à la projection sur

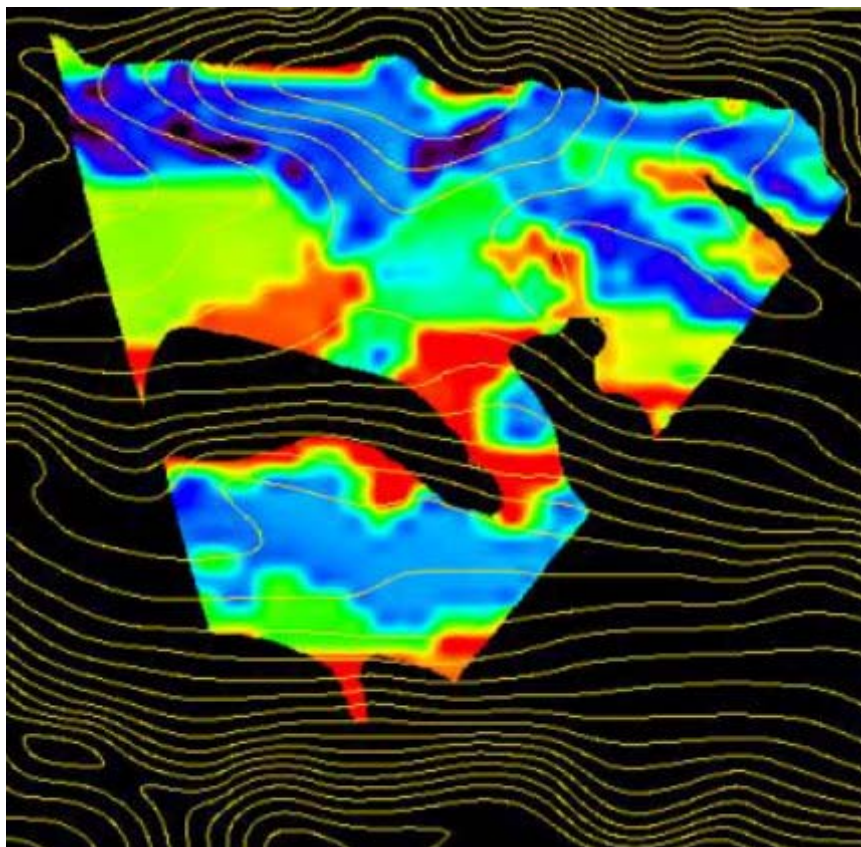
le plan du champ conique vu par l'appareil. Celui-ci est placé au point le plus élevé en bas de l'image. Les zones noires dans la zone colorée de l'image correspondent à des surfaces non visibles dues à des pentes trop fortes ou des zones masquées pour lesquelles la lumière est trop faible ou l'angle de vision trop tangentiel. Le soleil est encore à l'est à l'heure de la photo. La table des couleurs est étirée et contrastée pour mieux montrer les différences et les valeurs correspondent au rouge pour les plus élevées et au bleu pour les plus basses. Les valeurs basses dans la partie supérieure gauche de l'image sont dues à la présence de barres rocheuses et à l'orientation de la pente, perpendiculaire au soleil à cette heure du jour, ce qui se traduit par une efficacité accrue du rayonnement solaire et une rapide métamorphose de la neige.

Les conditions météorologiques du jour de la prise de vue sont caractérisées par des vents modérés et des températures basses, un transport modéré de neige est observé pendant les heures précédentes. La surface du manteau neigeux présente une fine croûte de radiation de faible albédo ensevelie sous des précipitations nouvelles. Une partie de cette croûte réapparaît à la surface par endroit après l'épisode de transport. Des variations renforcées de l'albédo résultent de cette situation, elles correspondent à des zones de neige fraîche et des zones de grains plus gros qui ont été plus fortement métamorphosés. Cette situation, très favorable, montre un contraste prononcé entre les réflectivités des différents types de neige de surface, cela permet de confirmer notre hypothèse de départ.

Pour cette date, la comparaison entre la photo et les résultats de la modélisation montre une corrélation relativement bonne. Les principales zones d'albédo coïncident entre les deux images. Les zones sur lesquelles nous nous attendons à des métamorphoses moins développées, comme les pentes à l'ombre ou celles très fortes sous le Pic Blanc sont bien identifiées sur la photo. La petite partie à fort albédo s'étendant vers le sud-ouest en partant du centre de la pente est visible sur la photo mais pas sur les sorties de modèles, elle correspond à des irrégularités de la neige de surface dues à une petite avalanche, événement que ne peut pas intégrer Sytron2.



a)

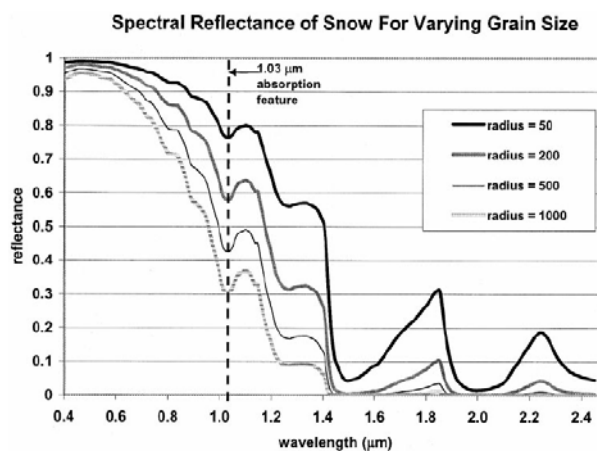


b)

Figure 3: albédo déduit des types de grains en surface du manteau neigeux simulés par Sytron2 pour le 18 février 2003. Les couleurs sont renforcées pour mettre en évidence les différences (en rouge les valeurs les plus élevées). Le nord est à droite.

4.2 Période du 5 avril 2003 :

Une approche différente est utilisée pour la figure 4, pour laquelle nous avons employé un filtre infra-rouge. Ce filtre coupe toute la lumière dont la longueur d'onde est plus petite que 790 nm, ainsi cette image révèle la réflectivité infra-rouge de la neige. La variation de l'albédo de la neige est maximum dans cette partie du spectre lumineux (Nollin, 2000, voir graphique ci-dessous), cela renforce le contraste de la neige de surface selon ses caractéristiques. Les zones sombres sont des régions où la neige a été érodée par le vent, exposant ainsi des strates de neige ancienne et dans la plupart des cas une fine croûte de regel. Cela a été confirmé par une observation de la neige de surface peu de temps après la prise de la photo. La différence est plus visible que sur la photo en bande visible qui montre une surface uniforme, tandis que l'image proche infra-rouge présente deux surfaces de neige très contrastée, la zone plus sombre correspondant à une croûte ayant refait surface après l'épisode de transport (vent modéré à fort de nord-est).



Réflectivité spectrale bidirectionnelle de la neige. Chaque courbe représente les rayons de différents types de neige (Nollin, 2000).





b)

Figure 4 : comparaison entre une image photographiée dans le visible et proche infra-rouge a) et celle filtrée qui supprime les longueurs d'ondes inférieure à 790 nm b). Sur la photo infra-rouge le contraste est renforcé à cause des différences de type de neige. Cette photo est prise depuis le Pic Blanc (3 300 m).

Afin d'établir un lien entre les zones d'érosion et d'accumulation de l'image et les sorties du modèle, une classification manuelle a été faite sur une photo en utilisant la photo en proche infra-rouge et les connaissances recueillies et observées sur le site expérimental. Ces zones ont été marquées en couleur sur la photo et celle-ci a été ensuite géo-référencées en utilisant le Mnt (figure 5 a). Le résultat est comparé aux sorties de Sytron2 pour les zones d'accumulation et d'érosion (figure 5 b). Globalement les surfaces importantes d'accumulation coïncident entre les deux images. La partie supérieure de la zone d'accumulation au dessus du centre de l'image ne se retrouve pas sur l'image 5 a, elle correspond à la présence d'une piste de ski et les perturbations dans cette zone sont importantes. Les zones d'érosion les plus grandes montrent également une bonne corrélation, à l'exception de la partie gauche de la photo à cause de la présence de barres rocheuses non visibles à l'échelle du Mnt.

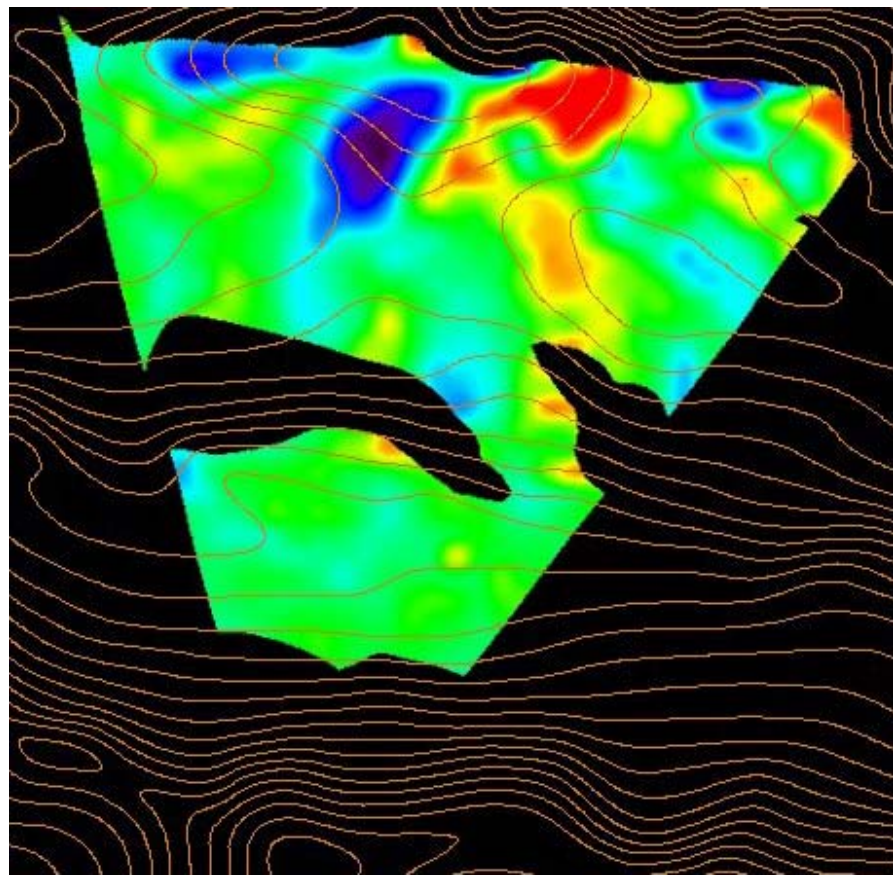
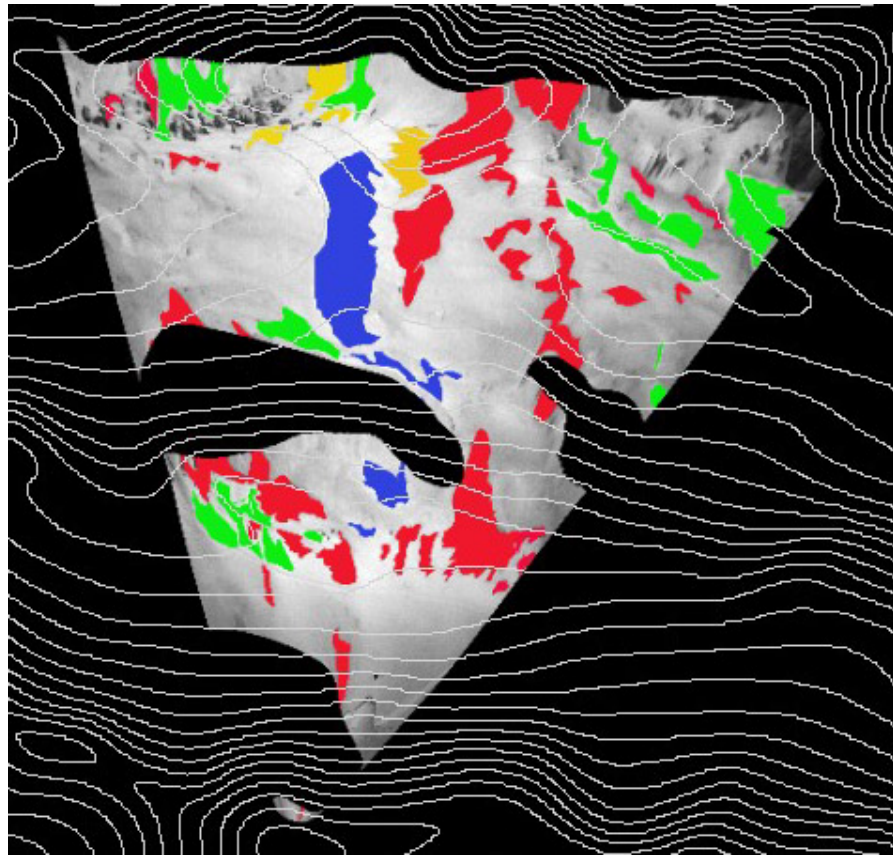


Figure 5 : comparaison entre les zones d'érosion et d'accumulation marquées "à la main" (a) et celles modélisées par Sytron2 (b) sur le site expérimental du Col du Lac blanc. Les couleurs vont de rouge pour l'érosion à bleu pour les accumulations. Le nord est à droite.

5 – Limites et perspectives :

La limite actuelle la plus sérieuse est l'impossibilité de modéliser les variations de neige à très petite échelle. L'augmentation de la résolution est limitée par les caractéristiques des Mnt disponibles, et surtout par le coût informatique et les incertitudes liés à l'affinement des échelles, notamment pour la modélisation du champ de vent. Les observations sur site et sur les photographies montrent pourtant que des variations sont visibles à des échelles plus petites que celle du Mnt utilisé.

Les développements prévus du modèle Sytron concernent surtout la gestion de plusieurs couches et leur interaction respective dans le manteau neigeux, l'amélioration des lois d'érosion/accumulation, l'amélioration de l'estimation du champ de vent et de l'évolution temporelle de la neige.

La technique de suivi photographique du site pourrait gagner en précision lorsque les points de contrôle au sol seront précisément repérés soit par relevé Gps différentiel, soit par relevé topographique traditionnel (théodolite). Cela devrait être possible prochainement. D'autres améliorations sont possibles par une meilleure prise en compte de la réflectivité de la neige. Cependant, compte tenu de la qualité de la prise de vue, de la diversité des tailles de grains et de leur conséquence sur la distribution spatiale du rayonnement réfléchi, ces dernières corrections resteront limitées.

6 - Conclusion :

Cette nouvelle technique pour apprécier les effets du vent sur le manteau neigeux, sur un domaine limité de haute montagne, a permis de progresser dans la validation spatiale des résultats des modèles en 2D, pour lesquelles de simples mesures ou observations sur site ne suffisent plus. De plus cette technique reste dans des coûts raisonnables, conformément aux contraintes que nous avons fixées au départ.

Nous avons bénéficié de la présence de Javier Corripio, post-doc (visiteur scientifique) au Cen (de novembre 2002 à octobre 2003), qui a utilisé ses connaissances et sa maîtrise du sujet, et a mis au point et développé de nouveaux logiciels pour permettre de concrétiser le traitement des photos numériques et contribuer très largement à la réalisation de ce projet.

L'approche est basée sur la reconnaissance, à partir de photographies terrestres, des variations optiques de la réflectivité de la neige et des zones qui peuvent être mises en correspondance avec les effets du transport éolien de la neige. Après cette première étape la comparaison qualitative des sorties observées et mesurées est satisfaisante et prouve que le modèle est capable de reproduire les tendances générales d'érosion et d'accumulation de neige à une échelle de quelques dizaines de mètres. Ce résultat est d'autant plus satisfaisant, lorsque l'on tient compte des contraintes de ce modèle qui doit présenter un temps raisonnable d'exécution si l'on veut pouvoir, dans le futur, l'intégrer dans des outils d'aide à la prévision locale du risque d'avalanches. Néanmoins, il reste encore une marge pour des améliorations, à la fois du modèle et du suivi photographique.

7 - Références en relation avec le projet :

Brun E., David P., Sudul M. et Brunot G., 1992 : A numerical model to simulate snow cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology* 38, 13-22.

Corripio, J.G., 2002 : Energy balance of high altitude glacierised basins in the central Andes and its climatic implications. *Ph thesis, University of Edinburgh. Unpublished.*

Corripio, J.G., 2003 : Vectorial algebra algorithms for calculating terrain parameters from DEM's and the position of the sun for solar radiation modeling in mountainous terrain. *International Journal of Geographical Information Science* 17, 1-23.

Corripio J.G., Durand Y., Guyomarc'h G., Mérindol L., Lecorps D. et Pugliése P., 2003 : Modeling and monitoring snow redistribution by wind. CRST submitted

Durand Y., Guyomarc'h G., Mérindol L. et Corripio J.G., 2003 : 2D numerical modeling of surface wind velocity and associated snow drift effects over complex mountainous orography. Accepted by *Annals of Glaciology*, in press.

Durand Y., Giraud G., Mérindol L. et Martin E., 1999 : A computer-based system simulating snow-pack structures as a tool for regional avalanche forecast. *Journal of Glaciology* 45, 466-484.

Anne W. Nolin and Jeff Dozier, 2000 : A Hyperspectral Method for Remotely Sensing the Grain Size of Snow. *Remote Sensing of Environment*, 74:207–216

Sergent C., Pougatch E., Sudul M. and Bourdelles B.: 1993 : Experimental investigation of optical snow properties. *Annals of Glaciology* 17 **17**, 281–287.

Sergent C., Leroux C., Pougatch E. et Guirado F.: 1998 : Hemispherical-directional reflectance measurements of natural snow in the 0.9-1.45 μ m spectral range: comparison with adding-doubling modeling. *Annals of Glaciology* **26**, 59–63.

Warren S.G., Brandt R.E. et Hinton P.O., 1998 : Effect of surface roughness on bi-directional reflectance of Antarctic snow. *Journal of Geophysical Research* 103, 25789-25807.

Wiscombe W.J. et Warren S.G., 1980 : A model for the spectral albedo of snow, I : pure snow. *Journal of the atmospheric sciences* 37, 2712-2733.