

**Titre du projet :**

Développement et mise au point d'un ensemble de capteurs de mesure de l'épaisseur de neige par ultrasons.

*G. Guyomarc'h, L. Mérindol, M. Sudul*

**Organisme pilote :**

Météo-France - Centre d'Études de la Neige  
1441, rue de la piscine  
38406 St-Martin d'Hères Cedex

**Organismes associés :**

CEMAGREF - Division Nivologie  
ANENA pour la gestion du projet

**Résumé du projet :**

Le but de ce projet était d'étudier, dans le cadre du programme "Répartition et Évolution de la Neige sur un Site d'Avalanches" financé par un contrat de plan État - région Rhône-Alpes, la possibilité de mesurer, en continu et en s'affranchissant des problèmes liés aux conditions météorologiques de haute montagne, l'évolution d'un profil du manteau neigeux le long d'une pente.

L'étude s'est déroulée sur trois années grâce à trois financements (1993-1994-1995) du Pôle Grenoblois. Elle a permis de mettre au point un dispositif constitué d'un ensemble de capteurs à ultrasons. Ceux-ci sont reliés, par l'intermédiaire d'une partie électronique sur une base déjà existante (capteur de hauteur de neige), à une centrale d'acquisition. Un système d'interface réalisant le multiplexage des capteurs a été développé. Ces travaux ont fait l'objet d'une communication lors de la journée organisée à l'Alpe d'Huez le 5 avril 1994 destinée à présenter les études réalisées au laboratoire du Col du Lac Blanc dans le cadre du projet "Neige, Vent et Avalanches". Par ailleurs, une communication a été présentée à l'ISSW (International Snow Science Workshop) en octobre 1996 à Banff (Canada), un texte a été publié dans les actes du colloque.

Nous avons testé cette installation dans les conditions réelles sur site de haute montagne (Col du Lac Blanc - Massif des Grandes Rousses - 2720 m) durant les hivers de 94-95 à 97-98. Ce dispositif était le complément d'études en cours de réalisation et a permis de valider les recherches entreprises concernant les effets du vent sur une topographie locale soumise au transport de la neige, en particulier dans les zones supérieures des couloirs d'avalanches. Il permettra de quantifier les vitesses d'accumulation ou d'érosion de la neige dans une pente. Celles-ci sont mal connues à ce jour et elles seront indispensables pour l'amélioration de modèles numériques de transport de neige par le vent.

**Financements obtenus :**

1993 : 53 kF

1994 : 40 kF

1995 : 30 kF

## Présentation du Programme Général :

A l'époque de ces contrats, quatre laboratoires s'étaient associés pour étudier les effets du vent sur la répartition spatiale du manteau neigeux. Ce projet avait fait l'objet de plusieurs financements dans le cadre de contrats de plan État - Région Rhône-Alpes. Le programme en cours d'exécution était "Répartition et Évolution de la Neige sur un Site d'Avalanches". Il s'était fixé comme objectif de simuler le fonctionnement de sites avalancheux soumis dans leur zone de départ au transport de la neige par le vent. L'objectif final était l'aide à la prévision du transport de neige dû au vent et de ses effets sur la stabilité du manteau neigeux.

Ce projet fut mené en étroite collaboration entre le Centre d'Études de la Neige (Météo-France), la division Nivologie (CEMAGREF) et pour les premières années un laboratoire de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne. L'ANENA (Association Nationale pour l'Étude de la Neige et des Avalanches) a assuré le suivi de la gestion financière, l'équipement du site du Col du Lac Blanc et son accès ont été rendus possible grâce à la Société d'Aménagement des Téléphériques de l'Alpe d'Huez (SATA).

Pour cette étude, des mesures hivernales ont été notamment axées sur:

- la mise au point d'instrumentation destinée à mesurer le transport de neige par le vent (CEMAGREF).
- La répartition spatiale de la neige par stéréo-photogrammétrie terrestre (EPFL).
- des mesures automatiques des conditions nivo-météorologiques (en particulier épaisseur du manteau neigeux), complétées sur le terrain par des mesures des caractéristiques de la neige de surface et le suivi manuel de profils d'enneigement, lorsque les conditions le permettaient (CEN).

Par ailleurs, des modélisations concernant l'analyse spatiale des sites d'avalanches (**Elsa** - Cemagref), la prévision du risque d'avalanches (**Safran-Crocus-Mepra** / Cen) et la prévision de l'occurrence du transport de neige (**Protéon** / Cen) ont été développés ces dernières années par les organismes associés au projet. Ces modèles utilisés de manière combinée sur un couloir avalancheux devaient permettre de simuler les mécanismes qui entrent en jeu lors du chargement du site par de la neige transportée par le vent, de déterminer le moment où le risque de déclenchement d'avalanches est imminent et de simuler l'ensemble des zones concernées par la neige en mouvement.

Les résultats proposés par les modèles devaient alors être confrontés à la réalité du fonctionnement du site naturel et validés, à la fois par des mesures terrains (sondages manuels du manteau neigeux), des reconstitutions de la répartition de la neige (photogrammétrie), des mesures manuelles de profils d'enneigement et **les mesures permanentes d'un profil du manteau neigeux dans le couloir (utilisation des capteurs par ultrasons)**.

## Présentation du projet financé par le Pôle Grenoblois:

Pendant trois hivers successifs, le Cen a développé un système et réalisé des mesures automatiques d'un profil d'enneigement sur un site soumis aux effets du vent grâce à un dispositif spécialement conçu à cet effet. L'objectif de ce travail était d'étudier finement la répartition temporelle et en 2D de la neige le long d'une pente.

Le site expérimental, déjà utilisé pour des études sur les caractéristiques du transport de neige par le vent, est situé à proximité du domaine de ski de l'Alpe d'Huez à 2 800 m d'altitude (Dôme des Petites Rousses). Une pente a été aménagée avec un ensemble de 7 capteurs ultrasons montés sur deux câbles

tendus entre deux pylônes. Ce système fournit des informations toutes les quinze minutes. Parallèlement, un suivi automatique des conditions nivo-météorologique est assuré à proximité du site (col du Lac Blanc). Les premiers enregistrements ont montré, que dans la plupart des cas, cet équipement reste fiable malgré des chutes de neige importantes, des périodes de vents forts ou de givrage intense. Cependant, un traitement statistique différé des données s'est avéré nécessaire pour éliminer les données aberrantes.

Nous attendons de ce dispositif qu'il nous fournisse des informations essentielles sur les durées nécessaires pour éroder ou accumuler une quantité de neige en fonction du vent et des caractéristiques initiales des particules de neige. Les paragraphes suivants décrivent le développement et les tests de cette installation, puis nous détaillerons les observations réalisées pour étudier les corrélations entre les conditions météorologiques et les caractéristiques morphologiques de la neige d'une part et l'évolution du manteau neigeux d'autre part.

## **Introduction**

**Cadre de l'étude** : Les effets du vent sur les particules de neige commencent dès le début des précipitations ventées. La structure fragile du cristal est rapidement fragmentée et la tailles des grains diminue. Immédiatement après une chute de neige, les grains de neige se déplacent dès que la vitesse du vent atteint un seuil caractéristique de chaque type de particule. Ces seuils dépendent de la température de l'air, du temps écoulé depuis la dernière chute de neige et de la cohésion des particules entre elles. Ainsi, ces grains de neige transformés par le vent produisent des accumulations de neige présentant des cohésions et duretés variables. La répartition de la neige sous l'influence du vent est essentielle pour la formation des plaques à vent et peuvent aboutir à des déclenchements, le plus souvent accidentels, d'avalanches.

**Recherches entreprises** : Après plusieurs travaux de recherche sur la neige soufflée, les accumulations dues au vent et, plus généralement, sur les effets du vent sur la répartition de la neige en haute montagne, il apparaît que la compréhension des phénomènes passe par la prise en compte des taux d'érosion ou d'accumulation d'une certaine quantité de neige sur la zone de départ des avalanches.

Pour améliorer notre compréhension du phénomène, basée sur des connaissances empiriques, nous avons commencé par effectuer des observations manuelles de sondes graduées installées le long de profils horizontaux du manteau neigeux. Malheureusement, les limites de ce système sont apparues rapidement lors de mauvaises conditions météorologiques. Il était impossible d'avoir accès au site et d'obtenir des données régulières. De plus pour notre étude, il est nécessaire de détailler en temps réel l'évolution de la neige pendant les épisodes de vents forts.

Ceci nous a amenés à développer ce nouveau dispositif basé sur un ensemble de 7 capteurs interrogés successivement et automatiquement. Des premiers essais (avec 4 capteurs) ont suivi les développements en laboratoire, lors de la fin de saison 1994-1995, puis en 1995-1996, 3 capteurs supplémentaires ont été ajoutés à l'installation.

## **Présentation du dispositif**

### **Quelles difficultés devons-nous résoudre?**

Les contraintes d'utilisation du dispositif étaient les suivantes :

- capacité de fonctionner dans toutes les conditions météorologiques.

- l'installation doit délivrer des informations régulièrement en temps réel et être facilement interrogeable depuis Grenoble.
- L'accès doit être aisé et le coût de l'installation doit rester dans les limites du financement accordé par le Pôle Grenoblois.

### Quel type de capteur peut-on utiliser?

Depuis quelques années, le Cen a participé à l'élaboration d'un capteur de mesure de l'épaisseur du manteau neigeux. Le principe des mesures repose sur le décompte du temps de parcours d'un train d'ondes ultrasonores émises par un transducteur fixé à une hauteur de 6m au-dessus du sol nu et réfléchies par la surface du manteau neigeux. Le capteur fonctionne successivement comme un émetteur, puis comme un récepteur. Un microprocesseur calcule ensuite l'épaisseur du manteau neigeux en prenant en compte trois paramètres : la durée du parcours, l'élévation du capteur au-dessus du sol et la vitesse de transmission des ondes (qui dépend de la température de l'air). Ce capteur est le résultat de nombreuses améliorations et fournit une précision de +/- 1 cm, quelles que soient les caractéristiques de la neige de surface. La fiabilité de ce type de capteur a été prouvée, même pendant des chutes de neige (figure 1) et permet de suivre précisément les périodes d'accumulation, de tassement et de fonte [Lecorps & Sudul, 1989]

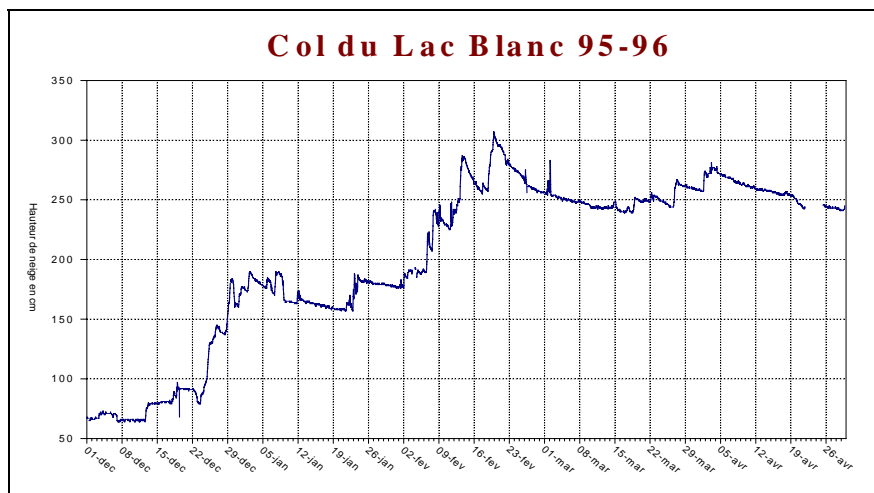


Figure 1 : graphique de l'épaisseur de neige au "Col du Lac Blanc" (2700m).

L'idée d'élaborer un ensemble de capteurs pour suivre l'évolution de la neige de surface a conduit à développer le système décrit dans la figure 2.

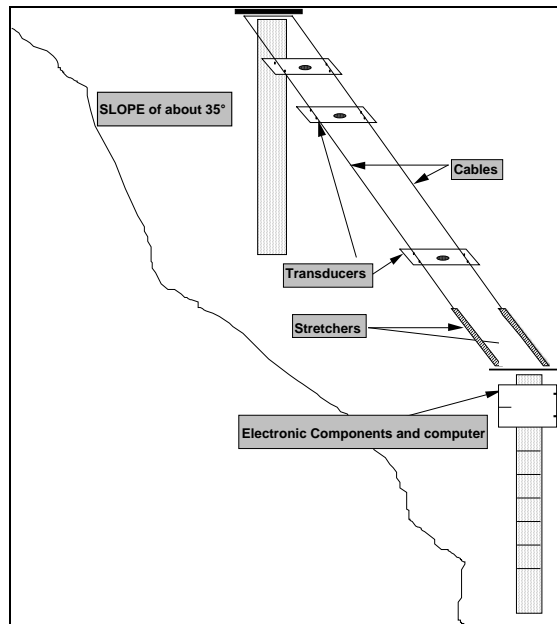


Figure 2 : schéma d'installation du profileur.

Quelques adaptations matérielles et logicielles furent nécessaires. Un système de multiplexage a été développé pour assurer le suivi de tous les capteurs, les uns après les autres (figure 3). Nous avons utilisé un échantillonnage de 15 min. Et les données sont enregistrées sur une station d'acquisition placée dans un abri sur le mât. Le réseau téléphonique permet d'interroger la station et de récupérer les données les plus récentes.

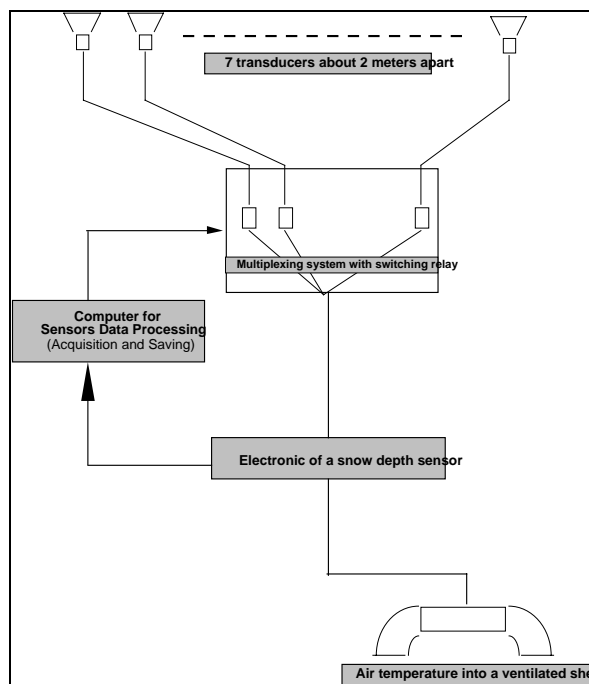


Figure 3 : synoptique de l'installation.

## **Où peut-on installer ce dispositif?**

Le "Dôme des Petites Rousses", situé à proximité de la station de l'Alpe de Huez a été choisi pour les raisons suivantes :

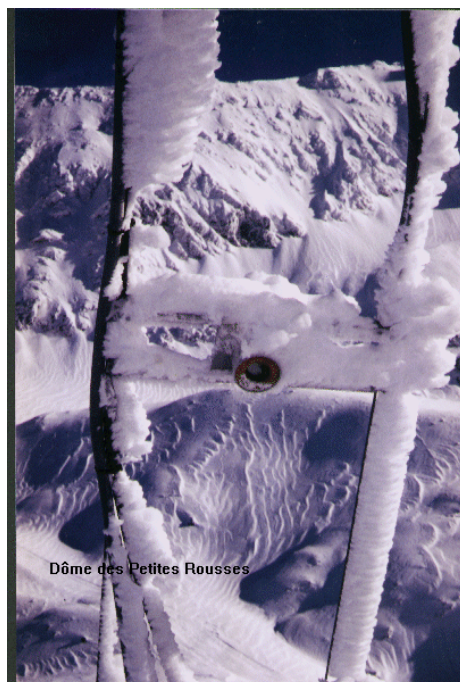
- l'existence tout près de ce site d'enregistrements de données météorologiques (vitesse et direction du vent, température de l'air, équivalent en eau des précipitations) disponibles au pas horaire de début novembre à fin avril depuis 5 ans.
- la proximité de notre site expérimental consacré à l'étude des effets du transport de neige par le vent (Col du Lac Blanc - 2 700m).
- son accès aisé par le téléphérique de Vaujany, même par conditions météorologiques difficiles.
- l'observation de l'activité avalancheuse réalisée par la Sata (Service des Pistes de l'Alpe d'Huez).

De plus, la pente choisie est perpendiculaire aux vents dominants, de pente relativement forte (35°) et soumise aux conditions de haute altitude (vent fort, givrage important et fortes précipitations)

## **Traitement et graphiques**

Les principaux problèmes que nous avons dus résoudre se trouvent résumés ci-après :

- les vents forts (moyenne horaire  $> 25$  m/s) secouent les câbles et peuvent dévier les ondes ultrasonores, qui ne sont alors plus reçues par le récepteur.
- les chutes de neige intenses peuvent induire des échos parasites qui provoquent des mesures fausses.
- le givrage (photo 4) peut surcharger l'ensemble de la structure et peut obturer les ouvertures des capteurs et être à l'origine de vibrations.



Pour éliminer les valeurs aberrantes, nous avons utilisé un traitement statistique différé. Celui-ci doit pouvoir restituer les données manquantes dans certaines conditions. L'épaisseur de neige est représentée par les mesures des sept capteurs le long d'une ligne parallèle à la pente. Le traitement statistique est constitué de 4 étapes : un premier lissage des données extrêmes, une vérification de la présence des données d'au moins 4 capteurs sur les 7, les valeurs absentes sont remplacées en utilisant une méthode de moyenne glissante (seulement si une seule valeur successive est absente) et un lissage final pour l'ensemble de la période considérée.(voir figure 5)

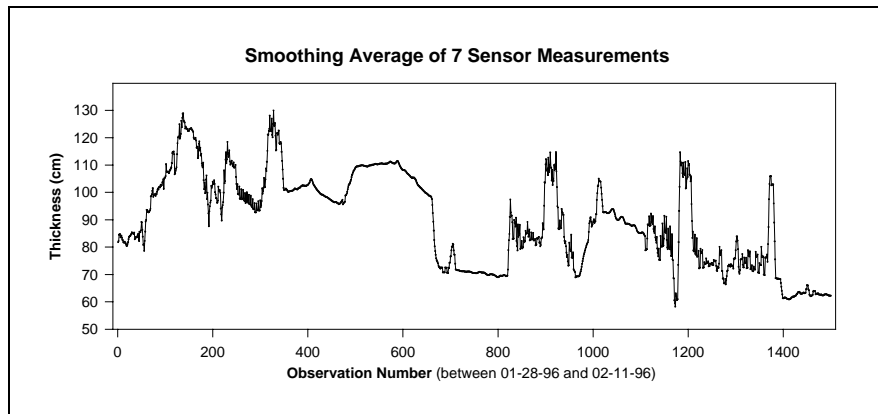


Figure. 5 : graphique d'une période de la saison 95-96 (entre le 28 janvier et le 11 février 1996). Les valeurs aberrantes ont été remplacées par une moyenne glissante et les données ont ensuite été lissées.

En complément de ce traitement, quelques paramètres statistiques ont été analysés. Par exemple, il est intéressant de comparer chaque donnée d'un capteur avec la moyenne lissée pour mettre en évidence son comportement particulier. Par ailleurs, le calcul de l'écart-type des valeurs du profil de neige à chaque pas de temps, fait apparaître le comportement différent des capteurs. Lors d'un épisode de transport la surface du manteau neigeux ne subit pas les mêmes modifications tout au long d'une ligne de pente.

## **Premières observations sur des périodes de transport de neige par le vent.**

### **Zoom sur une période de transport**

Le principal objectif de cette étude est d'obtenir des informations sur la corrélation supposée entre la durée d'érosion (ou d'accumulation) et les paramètres météorologiques (notamment la vitesse et la direction du vent). A titre d'exemple, les graphiques suivants représentent une période de 10 jours pendant laquelle on peut observer une période d'accumulation du manteau neigeux due à des chutes de neige, suivie d'une période d'érosion due au transport de la neige par le vent. Les courbes des capteurs de hauteur de neige (à cette époque, seuls 4 capteurs étaient installés) sont montrés sur la figure 6. Parallèlement, sur la figure 7, l'augmentation de la vitesse du vent et son changement de direction sont observés. Cette dernière, associée à l'orientation de la pente, détermine l'efficacité du vent sur le manteau neigeux.

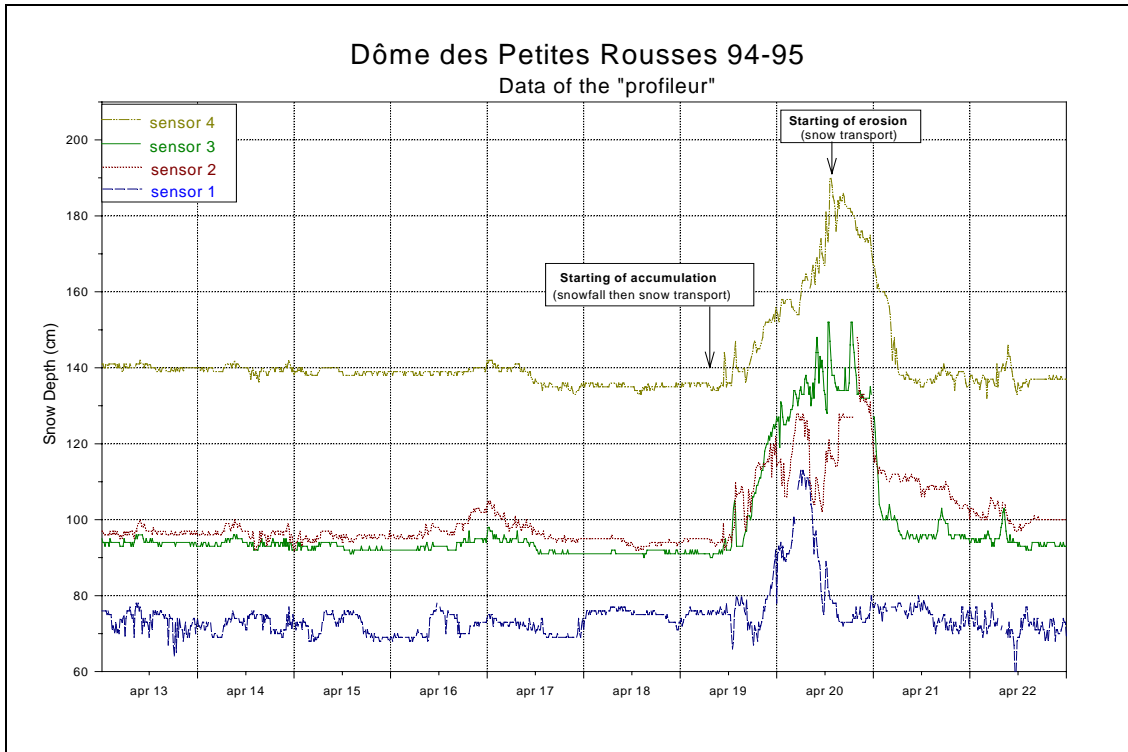


Figure 6 : Ces données montrent une période de transport de 48 heures.

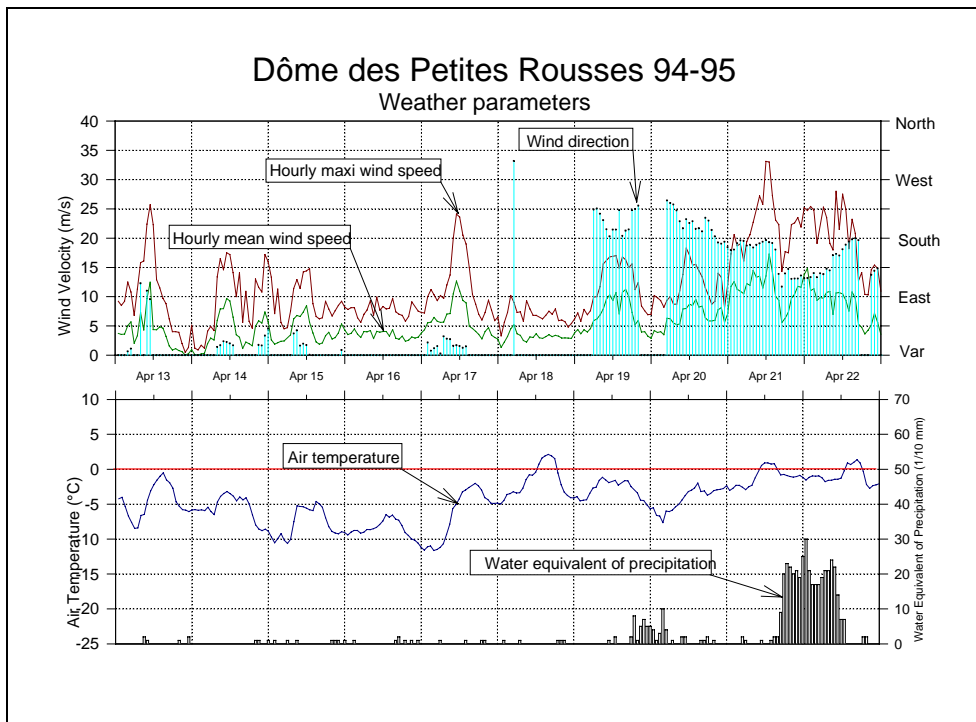


Figure 7 : Sur ce graphique, on peut suivre l'évolution des paramètres météorologiques en relation avec la période de transport.



Pendant cette période de transport (entre la fin de matinée du 19 et la fin de journée du 22), on peut distinguer 5 phases principales : 1, 2 & 3 pour l'accumulation de neige et 4 & 5 pour l'érosion. Ces phases sont caractérisées par:

1. L'augmentation sensible de la vitesse du vent (soufflant du sud sud-ouest) durant la journée du 19 et le début des précipitations.
2. Pendant la nuit du 19 au 20 avril, l'atténuation temporaire du vent alors qu'une faible chute de neige persiste.
3. Le matin du 20 avril, la vitesse du vent a augmenté (entre 5 et 10 m/s en moyenne) pendant que sa direction tourne au sud et que les chutes de neige cessent.
4. La vitesse du vent croît alors jusqu'à 15 m/s (valeur moyenne horaire) et 32 m/s en maximum horaire. La direction du vent tourne progressivement au sud-est puis à l'est. L'érosion de la neige de surface observée simultanément sur les 4 capteurs s'accroît malgré les importantes chutes de neige.
5. La moyenne horaire du vent se stabilise autour de 10 m/s et les chutes de neige n'ont aucun effet d'accumulation sur le manteau neigeux. La direction du vent est alors perpendiculaire à la pente. A ce moment, on peut considérer que l'épaisseur du manteau neigeux est revenue à sa valeur initiale. Dans cet exemple, on peut voir que le manteau neigeux est très sensible à une faible différence dans la direction du vent pendant un épisode de chutes de neige accompagnées de vents forts.

Pendant cet épisode de transport de neige, le temps nécessaire pour l'érosion de 50 cm de neige récente peut être calculé : en 17 heures et demi toute la neige accumulée par l'effet des précipitations et du vent s'est érodée, cela représente un taux d'érosion moyen de 2,8 cm par heure par un vent moyen de 10 m/s.

## **Conclusion.**

L'objectif de ce projet était de montrer la faisabilité d'une mesure automatique de l'évolution d'un profil de neige le long d'une pente soumise aux effets du vent. Il s'agissait aussi d'avoir une meilleure idée des liaisons entre ce phénomène et l'ensemble constitué des paramètres météo et des caractéristiques de la neige de surface. Les développements en laboratoire, puis les essais sur site, dans des conditions parfois difficiles, ont permis de faire fonctionner le dispositif de manière satisfaisante. Cependant, ces premières observations nous permettent de faire quelques remarques préliminaires:

- après 3 saisons hivernales de fonctionnement, le dispositif semble fonctionner régulièrement même lorsque les conditions météorologiques sont difficiles (givrage, vents forts, ...).
- cet équipement devrait nous permettre de suivre finement l'évolution temporelle d'un profil de neige soumis aux effets du vent.
- malheureusement, les hivers passés n'ont pas été très riches en épisodes de transport de neige ou de chutes de neige ventée, mais ce dispositif est un complément important des autres mesures liées au transport de neige faites sur le site du Col du Lac Blanc.
- Les principales difficultés sont liées aux problèmes de maintenance lorsqu'un des capteurs tombe en panne par exemple.

## **Remerciements.**

Ces études ont été initialisées grâce à l'aide financière du "Pôle Grenoblois d'Études et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels". Nous avons aussi bénéficié de la collaboration du service des pistes de l'Alpe d'Huez (SATA), notamment pour toute la partie installation sur site. L'Anena a été également sollicitée pour la gestion du projet.

## **Références.**

**Castelle T.**, 1994 *Mécanismes et simulations du transport de la neige par le vent en montagne : Application au site expérimental du Col du Lac Blanc*. Ph. D. E.P.F.Lausanne.(Suisse) 297 p.

**Guyomarc'h G., Mérindol L., Castelle T., Sivardière F., Buisson L.** 1994 *Blowing Snow and Slab Avalanches*. proceedings of 94'ISSW Snowbird (Ut-USA).

**Guyomarc'h G., Mérindol L.** 1995 *Protéon : vers une prévision locale du transport de neige par le vent*. Colloque Anena Chamonix pp 97-102

**Lecorps D., Sudul M.** 1989 *10 years of snow depth measurements* proceedings of International Workshop on Precipitation Measurements St Moritz (Switzerland)

**Rocca V.** 1996 *Traitement statistique des données d'un profileur du manteau neigeux*. Rapport DUT 2<sup>ème</sup> année.

**Sivardière F., Castelle T., Guyomarc'h G., Mérindol L., Buisson L.** 1994 *Functioning of the avalanche starting zones which undergo snow-transport by wind : field observations and computer modelling*. Surveys in Geophysics. EGS, 25-29 April 1994. Grenoble (France).