

## **Neige et Vent : Effet du Vent sur la Répartition du Manteau Neigeux**

### **RESUME :**

Le transport de neige par le vent représente un danger pour les activités humaines en milieu montagnard. Si les effets directs (congères sur les voies de communication) ou indirects (aggravation du risque d'avalanches) sont bien connus des populations alpines, les mécanismes physiques, en revanche ont fait l'objet de très peu d'études. C'est pour combler cette lacune que fut entrepris le projet de recherche "**Transport de la neige par le vent**".

L'**objectif** final de cette recherche est une meilleure connaissance du transport de la neige par le vent sur les sites de montagne et de ses effets sur l'activité avalancheuse afin d'améliorer la protection contre les avalanches et la circulation hivernale dans les massifs montagneux.

La **démarche** adoptée visait à rechercher et à analyser sur le terrain les phénomènes prépondérants, les mesures servant de référence pour le développement de modélisations.

Dans la **première étape** du projet (1989-1990), l'effort a porté sur le développement de techniques de mesures in-situ. Un laboratoire d'altitude (2720 m) situé au Col du lac Blanc à l'Alpe d'Huez a été équipé pour suivre l'évolution des conditions nivo-météorologiques au cours de l'hiver mais surtout pour permettre l'observation du phénomène en période de transport de neige.

Lors de la **deuxième étape** (1990-1991), les mesures hivernales in-situ ont été intensifiées. La technique de prise de vue stéréophotogrammétrique a été mise en place de manière à suivre l'évolution des dépôts au cours de l'hiver en fonction des conditions météorologiques. Un prototype de radiomètre de terrain a été testé.

Durant la **troisième étape** (1991-1992), le nombre de données de qualité acquises sur le terrain devenant conséquent, il a été possible de développer des travaux de formulation puis de modélisation destinés à la pratique. Pour la gestion temporelle du risque d'avalanches, il a été possible d'élaborer un modèle de prévision de l'occurrence et de l'intensité du transport de neige sur un site bien documenté. Pour la gestion spatiale des risques liés à l'aménagement d'un site en montagne, des modélisations physiques en soufflerie permettent de prévoir les effets du transport de neige sur les ouvrages. Un modèle numérique de transport basé sur l'interaction entre bouffées turbulentes et particules a également été développé.

Par une approche **multidisciplinaire** et une collaboration entre plusieurs laboratoires de recherche et des professionnels de la montagne, il a été possible de réaliser des progrès notables dans la connaissance du phénomène. Les travaux menés dans cette recherche constituent une des études les plus approfondies sur le sujet. Les compétences et les méthodes acquises dans ce projet seront d'ailleurs **appliquées** à l'étude du fonctionnement de **couloirs d'avalanches** situés dans des zones de transport de neige par le vent (Projet : **Neige, Vent et Avalanches**).

## Chapitre 1 - Les objectifs du programme

### La démarche

L'étude du transport de la neige par le vent en montagne est complexe, car elle nécessite des connaissances de météorologie, de mécanique des écoulements de particules et de nivologie. Pour cette raison, il était indispensable de constituer une équipe pluridisciplinaire à forte complémentarité. Celle-ci fut constituée par l'association de quatre laboratoires de recherche (CEN, CEMAGREF, EPFL, IGA) et de professionnels (SATA, ANENA). Le projet comportait trois volets (Figure 1) correspondant approximativement aux trois années du programme.

### Le projet et la mise en place d'un groupe de recherche

Les organismes qui se sont associés au départ du projet sont la Division Nivologie (CEMAGREF), le Centre d'Études de la Neige (Météo France) et le Laboratoire de la Montagne Alpine (Université Joseph Fourier). Les trois laboratoires cherchaient un site où ils pourraient étudier en commun les phénomènes de transport éolien de la neige et plus généralement un certain nombre de thèmes qui ne pouvaient être abordés que grâce à l'équipement d'un laboratoire d'altitude. Très vite, le site du col du Lac Blanc, à proximité du domaine skiable de l'Alpe d'Huez, a été retenu. La SATA (Société d'Aménagement Touristique de l'Alpe d'Huez) a su comprendre l'intérêt de ce programme d'étude et lui a apporté un soutien sans lequel il n'aurait jamais pu se développer. Un autre élément important de réussite a été l'intervention de l'Association Nationale pour l'Étude de la Neige et des Avalanches (ANENA) sur le plan de la gestion des contrats. Ultérieurement, le Département de Génie Civil de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne s'est joint au projet.

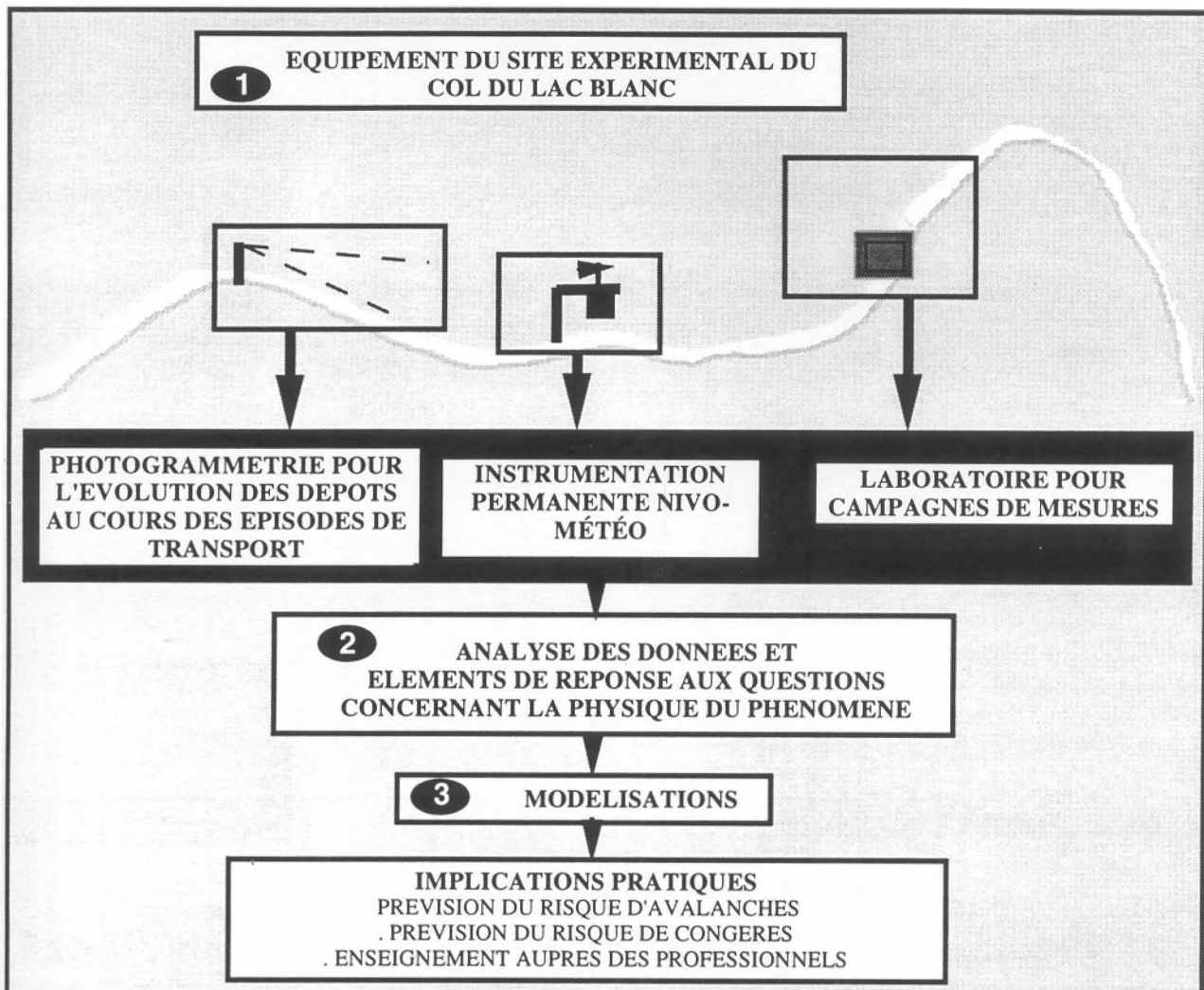


Fig 1 : Démarche du projet " Neige et Vent "

	1989-1990	1990-1991	1991-1992
<b>Attribution financière (montant TTC en FF)</b>	250 KF	250 KF	250 KF
<b>Gestion financière du projet</b>	CEMAGREF	ANENA	ANENA
<b>Grandes orientations scientifiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipement de façon "lourde" d'un site expérimental d'altitude (le Col du Lac Blanc)</li> <li>• Enregistrement en continu des conditions météorologiques sur le site</li> <li>• Etude de la relation entre l'état de surface de la neige et la vitesse seuil de transport</li> <li>• Création d'une base de données pour le développement et la validation des modèles numériques et physiques de transport de neige par le vent</li> <li>• Essais de Validation des modèles de réflectance du manteau neigeux pour différentes catégories de neiges transportées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le principe des campagnes de mesures intensives lors des épisodes de transport est jugé très positif</li> <li>• Analyse des conditions de transportabilité de la neige</li> <li>• Utilisation opérationnelle des techniques de visualisation laser pour la trajectographie</li> <li>• Etude de faisabilité des techniques de photogrammétrie terrestre et aérienne pour l'évaluation des dépôts de neige sur le site</li> <li>• Etude de la réflectance de la neige transportée par le vent</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etude des conditions de transportabilité</li> <li>• Recherche d'une relation entre le flux de neige et la force du vent</li> <li>• Utilisation opérationnelle de la photogrammétrie pour étudier l'effet du vent sur la répartition des hauteurs de neige</li> <li>• Préparation de cours destinés aux praticiens et valorisation des résultats par des publications scientifiques</li> </ul>
<b>Réalisations de terrain</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mise en place des capteurs météorologiques de la station Nord météorologique</li> <li>• Système de transmission des données météo du Col vers la SATA et le CEN</li> <li>• Sondages par battage et profils statigraphiques hebdomadaires</li> <li>• Prélèvement et analyse d'échantillons de neige de surface</li> <li>• Premières mesures hivernales réalisées sur plusieurs jours lors des épisodes de transport (campagne intensive)</li> <li>• Premiers essais du SPC en vue d'évaluer les durées des épisodes de transport</li> <li>• Mesures de concentration de neige transportée à l'aide de boîtes prismatiques et de filets</li> <li>• Essais de trajectographie des particules de neige transportée par visualisation laser</li> <li>• Test de barrières à neige</li> <li>• Test du radiomètre de terrain sur différents types de surface neigeuse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mise en place en début de saison de l'équipement météorologique automatique</li> <li>• Sondages hebdomadaires</li> <li>• Prélèvement d'échantillons de neige à la surface du manteau neigeux et lors des épisodes de transport</li> <li>• Mise en place du SPC comme capteur permanent de neige transportée par le vent</li> <li>• Utilisation opérationnelle de la visualisation laser pour la trajectographie des particules en mouvement</li> <li>• Profils simultanés de concentration et de vitesse du vent lors du transport</li> <li>• Premiers essais de photogrammétrie terrestre et aérienne</li> <li>• Campagnes de radiométrie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mise en place de l'équipement usuel en début de saison et d'un capteur de hauteur de neige au sud du Col</li> <li>• Mesures des caractéristiques de surface du manteau neigeux et évolution de ces conditions lors des épisodes de transport</li> <li>• Réalisation de profils de concentration et de vitesse lors des épisodes de transport</li> <li>• Premiers essais du DNTV</li> <li>• Prise de vues photogrammétriques avant et après chaque épisode de transport</li> </ul>

## Chapitre 2 : Chronologie des actions entreprises dans le programme "Neige et vent"

### **Chapitre 3- Les travaux scientifiques réalisés**

#### **Étude de l'érosion**

##### **-la vitesse seuil**

La vitesse seuil est un paramètre caractéristique de l'état de la neige de surface qui varie selon la taille des grains, leur forme, ... Il dépend également des conditions météorologiques. Malgré leur importance ces paramètres n'étaient jusqu'à présent pas pris en compte pour la prévision du transport de neige. Un des buts de l'expérimentation in-situ était de définir pour différents types d'état de surface les relations entre le flux de neige transportée et la vitesse du vent.

##### **-l'éjection des particules**

La théorie classique consiste à considérer que la particule est éjectée par un échange de quantité de mouvement dû au choc d'une particule qui percute le sol. Une autre hypothèse envisage que la turbulence du vent est la seule cause d'éjection des particules. Pour modéliser correctement le transport de la neige par le vent nous avons voulu rechercher sur le terrain des indices en faveur de l'une ou l'autre des deux théories. Sur le terrain nous avons développé un système de trajectographie par visualisation laser (T. Castelle, T. Fournel et al.).

#### **Étude des conditions nivo-météorologiques lors du transport**

Les mesures météorologiques du col du Lac Blanc ont été effectuées par une station automatique et complétées par des mesures manuelles faites lors du transport (G. Guyomarc'h, L. Merindol, 1991). Les mesures in-situ consistaient à prélever des échantillons de neige dans le transport de manière à connaître les caractéristiques cristallographiques de la neige transportée.

#### **Étude du dépôt**

Dans certaines conditions, le phénomène d'érosion et de dépôt de la neige au sol peut modifier totalement la morphologie du site. Si ce phénomène est souvent observé dans la nature, on dispose de très peu d'informations quantitatives permettant de le prévoir. L'objectif de l'étude des dépôts que nous avons réalisée sur le site du Col du Lac Blanc, était d'analyser quantitativement l'effet du vent sur la répartition des hauteurs de neige sur une grande surface (T.Castelle, O.Kölbl et al, 1991). Afin d'obtenir une information spatiale sur la répartition de la neige, nous avons décidé d'utiliser la photogrammétrie terrestre. Cette opération nous a permis de déterminer sur le terrain la position des zones d'érosion et d'accumulation puis de quantifier les masses de neige déplacées lors des tempêtes.

### **Chapitre 4- Implications pratiques**

#### **Prévision du risque d'avalanches**

Pour améliorer la prévision du risque d'avalanches, les effets du transport de la neige par le vent (érosion/dépôt) doivent être pris en compte dans les méthodes d'évaluation du risque. Les mesures in-situ réalisées lors du projet "Neige et Vent", permettent de mieux comprendre les mécanismes de transport et leur influence sur l'évolution du manteau neigeux. L'objectif est d'intégrer ces connaissances dans les modèles d'évolution du manteau neigeux et d'évaluation du risque d'avalanches. Par ailleurs nous avons voulu développer un modèle de prévision de l'occurrence et de l'intensité du transport de neige sur un site bien documenté tel que celui du Col du Lac Blanc (G. Guyomarc'h, 1993).

#### **Prévision du risque de congères**

##### **-Modélisation en soufflerie**

Grâce aux travaux de photogrammétrie entrepris sur le site du Col du Lac Blanc, on dispose pour la première fois de données permettant la validation quantitative des modélisations physiques. Une maquette topographique du Col du Lac Blanc a été construite à l'échelle 1/250 à partir des clichés photographiques réalisés sur terrain sans neige. Les simulations consistent à reproduire en soufflerie, à l'aide de fines particules de verre, des épisodes de transport de neige par le vent analogues à ceux enregistrés sur le site réel. Les dépôts mesurés en laboratoire sont ensuite cartographiés puis comparés aux hauteurs de neige obtenues par la photogrammétrie terrestre. Ceci permet

de quantifier les erreurs de simulation (Kölbl, Castelle, 1993).

#### **-Modélisation numérique**

La modélisation du transport de neige proprement dite consiste à formaliser et reproduire les phénomènes d'érosion, de transport et de dépôt de la neige par le vent. Pour cette étape du travail, les mesures réalisées sur le Col du Lac Blanc et en particulier la trajectographie (Castelle, Fournel et al., 1991) ainsi que la photogrammétrie (Castelle, Kölbl et al., 1991) ont permis de vérifier les hypothèses du modèle numérique de transport de la neige que nous avons développé dans le cadre du projet "Neige et Vent" (Clappier, Castelle, 1991).

#### **Développement d'instrumentation et de méthodes**

Le plan d'étude fixé dans le programme "Neige et Vent" prévoyait l'observation du phénomène sur le terrain. Cette démarche nous a conduit à faire un important effort de développement de techniques et de méthodes spécifiques à l'étude du transport de neige par le vent. Certaines de ces méthodes trouvent une application directe dans la pratique.

#### **-Utilisation de la photogrammétrie en montagne**

Pour connaître l'évolution des dépôts de neige sur une grande surface au voisinage du Col du Lac Blanc, nous avons mis au point des techniques photogrammétriques (Castelle, Kölbl et al., 1991). La méthode consistait à réaliser une prise de vue après chaque épisode de transport, de manière à suivre l'effet des tempêtes sur la topographie du site.

#### **-Mise au point d'un détecteur de neige transportée par le vent**

Dès le début de nos études in-situ, nous avons voulu quantifier la durée et l'intensité de chaque épisode météorologique pendant lequel la neige était transportée par le vent sur le site. Nous avons décidé de développer à partir d'un produit industriel de grande diffusion, un nouveau capteur. Le choix s'est porté sur les lecteurs optiques de code barre. Ces capteurs procèdent par réflexion : émetteur et récepteur étant fixés dans le même boîtier. Après quelques modifications techniques, le capteur a été testé avec succès pendant l'hiver 1991-1992. Durant l'été 1992, le Détecteur de Neige Transportée par le Vent (DNTV) a été fiabilisé et adapté pour une utilisation intensive compatible avec le fonctionnement d'une station automatique.

#### **-Utilisation d'un radar Doppler**

Durant la campagne de mesures 1991-1992, un radar Doppler, utilisé par ailleurs en météorologie pour la discrimination entre la pluie et la neige, a été installé sur le Site du Col du Lac Blanc. Le but était de tester sa capacité à détecter la présence de transport de neige sur le site et à mesurer la vitesse des particules en mouvement (Duvernoy et al., 1992).

#### **-Mise au point d'un radiomètre**

L'objectif des campagnes de mesures menées par le LAMA était de pouvoir établir une relation explicite entre la caractérisation des couverts neigeux (type de grains) et leur réponse radiométrique enregistrée par des instruments optiques en conditions naturelles. Nous nous sommes essentiellement consacrés à la caractérisation de surface à partir de mesures régulières sur différents secteurs du Col (Dedieu, 1990). Durant les saisons hivernales 1989-1990 et 1990-1991, un prototype de Réflectancemètre de Terrain a été utilisé sur le site en alimentation autonome. Le concepteur de cet appareil est le Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) du CNRS de Lille.

#### **Enseignement et communication auprès des professionnels**

Les publications (chapitre 5) et les participations à des congrès ont contribué significativement à la valorisation des résultats scientifiques obtenus dans le cadre du projet "Neige et Vent". Un effort particulier de transmission de l'information vers les praticiens français et étrangers a été réalisé lors de l'Université Européenne de Septembre 1992 consacrée aux risques liés à la neige et à la glace.

## **Chapitre 5- Publications**

### **Recherche :**

#### **Étude de l'érosion :**

T. Castelle, T. Fournel, M. Moine, L. Rippert, M. Gay, 1991 : *Mesure des vitesses et des concentrations de particules en saltation par plan laser puis traitement d'images. IKAR/CISA-ANENA Symposium, Chamonix Juin 1991.*

S. Ribeyre, 1992 : *Étude du transport de neige par le vent : Influence de l'état initial du manteau neigeux. Mémoire de diplôme d'ingénieur ISIM.*

#### **Étude du transport :**

G. Guyomarc'h, L. Merindol, 1992 : *Étude du transport de la neige par le vent. IKAR/CISA-ANENA Symposium, Chamonix Juin 1991.*

T. Castelle, 1993 : *"Mécanismes et simulations du transport de neige par le vent en montagne". Thèse EPFL prévue pour Sept 93 et dont un exemplaire sera envoyé ultérieurement au secrétariat du Pôle Grenoblois sur les Risques Naturels.*

#### **Étude du dépôt :**

T. Castelle, O. Kölbl, Y. Hawawini, J.Ph. Voisin, R. Burnet, M.O. Christinat, 1991 : *Utilisation de moyens stéréophotogrammétriques pour la saisie de l'évolution des dépôts de neige. IKAR/CISA-ANENA Symposium, Chamonix Juin 1991.*

### **Développement de méthodes et d'instrumentation :**

#### **Modèles :**

A. Clappier, T. Castelle, 1991 : *Modélisation numérique du transport de neige par saltation. IKAR/CISA-ANENA Symposium, Chamonix, Juin 1991.*

F. Sivardière, T. Castelle, J.-A. Hertig, C. Wuilloud, 1991 : *Modélisation en soufflerie du transport de neige par le vent en haute montagne : l'exemple de Varneralp. IKAR/CISA-ANENA Symposium Chamonix, Juin 1991*

G. Guyomarc'h, 1993 : *Prévision du transport de neige. Rapport interne Météo France, CEN 1993.*

#### **Photogrammétrie :**

O. Kölbl, T. Castelle, 1993 : *Utilisation de la photogrammétrie pour l'évaluation des dangers de la couverture neigeuse. Actes du congrès de la S.H.F. Grenoble 1992.*

#### **Instrumentation :**

M. Roussel, 1992 : *Mise au point d'un capteur de neige transportée par le vent. Rapport interne du groupe Neige et Vent 1992.*

Duvernoy G. , Thibord C. , 1993 *Schumann : Bilan de la campagne de mesure 1992 au Col du Lac Blanc. Rapport interne Météo France - SETIM.*

J.P Dedieu, 1991 : *Radiométrie visible et infrarouge du manteau neigeux. La Houille Blanche N° 5-1991.*

H. Martinez, M Naaim, 1993 : *Application du traitement d'images à la mesure du transport et de la diffusion dans un écoulement. Conférences de la S.H.F Mars 1993.*

### **Enseignement et valorisation auprès des professionnels :**

#### **Cours :**

T. Castelle, 1992 : *Snow Transport by Wind in Mountainous Regions. Cours de l'Université d'été sur les Risques Naturels. Chamonix, Juin 1992.*

G. Guyomarc'h, T. Castelle, 1992 : *A study of drift-snow phenomena on an Alpine Site. International Snow Science Workshop Breckenridge Colorado Octobre 1992.*

F. Naaim, F. Sivardière : *Local Protection against Snow Accumulation due to Wind : Wind Structures and Afforestation. Cours de l'Université d'été sur les Risques Naturels. Chamonix, Juin 1992.*

F. Sivardière, T. Castelle : *Les ouvrages à vent : Protection locale contre les accumulations de neige dues au vent. Revue Neige et Avalanches, N° 60, 1992.*

O. Kölbl : *Photogrammetry : an essential tool for engineers. Cours de l'Université d'été sur les Risques Naturels. Chamonix, Juin 1992.*

#### **Manuels pour les praticiens :**

T. Castelle, J.-A. Hertig, J.-M. Fallot, 1991 : *Protection des routes alpines contre les congères. Manuel OFR/EPFL. 360 pp.*

F. Naaim, G. Brugnot, 1992 : *Transport de la neige par le vent : connaissances de base et recommandations.*