Résumé

Le transport de neige par le vent entraîne la formation de corniches et de plaques, génératrices d'avalanches en haute montagne, et la formation de congères sur les voies de communication en plaine. Il est de ce fait à l'origine de risques naturels qui peuvent engendrer de graves conséquences pour les biens et les personnes.

Un premier ouvrage intitulé « Transport de la neige par le vent : connaissances de base et recommandations » a été édité par le Cemagref en 1992. Il faisait le point sur les règles empiriques permettant de mettre en place une ingénierie de protection contre ce phénomène.

Depuis son édition, de nombreuses recherches ont été entreprises. Elles ont apporté des progrès significatifs dans la compréhension physique des processus et leurs occurrences tant dans l'espace que dans le temps. L'enjeu du présent ouvrage, qui tente de répondre à la question que chaque ingénieur se pose « Où et en combien de temps, se forme une accumulation de neige ? » est de faire la synthèse de ces connaissances et des outils de modélisation récents.

La première partie de cet ouvrage a donc pour objectif d'appréhender la complexité des phénomènes et de tenter de comprendre les mécanismes mis en jeu. Elle traite successivement, de la couche limite, de l'arrachement aérodynamique des particules, des différents modes de transport éoliens et de l'obtention des profils de transport à saturation. Cette partie fait ainsi le point sur les connaissances actuelles dans ce domaine.

La deuxième partie est dédiée aux outils de modélisations physique et numérique. Elle débute par une synthèse des différentes approches réalisées par la communauté scientifique internationale pour se terminer par la présentation de la contribution propre des équipes du Cemagref.

Summary

Blowing snow produces cornices, source of dangerous avalanche starting zones in high mountainous areas, and snowdrifts on the roads in plains. Therefore, it is the cause of natural hazards having serious consequences for goods and people.

A first book entitled « Drifting snow : basic knowledge and recommendations » and edited by Cemagref in 1992, reviewed the empirical rules necessary to set up protection against this phenomenon.

Since this edition, many researches were carried out. Significant progress was achieved in the physical comprehension of the processes involved and their occurrences in the space as well as in the time. This book tries to provide answers to the question each engineer is faced with « For a given meteorological episode and for a given topographic configuration, where does snow accumulate and in how long ? ». So, this work aims at realizing the synthesis of this knowledge and recent modelling tools.

The first part of this work is concerned with the description of the physical mechanisms involved in blowing snow and it deals successively with : the boundary layer, the aerodynamical entrainment of particles, the different types of particles transport and the particles profiles at saturation. A synthesis of the current knowledge in this field is put forward in this part.

The second part covers the physical and numerical modelling. It starts with a synthesis of the different approaches developed by the international scientific community and ends with the presentation of the Cemagref teams own contribution.

Introduction

Le transport de neige par le vent se manifeste de façons différentes selon le relief rencontré.
On distinguera d'une part le contexte "haute montagne" et d'autre part le contexte "plateau" où les petites irrégularités sont déterminantes.
Pour une direction de vent donnée, le relief est la clé explicative de la répartition de la neige au sol : le vent dégarnit les zones les plus exposées *(crêtes, arêtes...)* et enneige les plus abritées *(combes, ravins...)*.

1. Transport de la neige par le vent en haute montagne

Dans un contexte de haute montagne, formation de corniches, plaques à vent et ablation de la neige sur les domaines skiables sont les principaux problèmes rencontrés :
en effet, au niveau d'une crête, l' écoulement d'air, comprimé par le relief, s'accélère. Mais sous le vent de la crête, dans la zone tourbillonnaire, il est ralenti et dépose une partie des grains transportés. Ces particules de neige s'accumulent, en formant une corniche *(figure 1 et photographie 1)* ; celle-ci grandit au cours de l'épisode venteux. C'est la cohésion de frittage *(création de ponts de glace entre les particules de neige)* de la neige qui permet la formation de la corniche, qui surplombe l'arête.

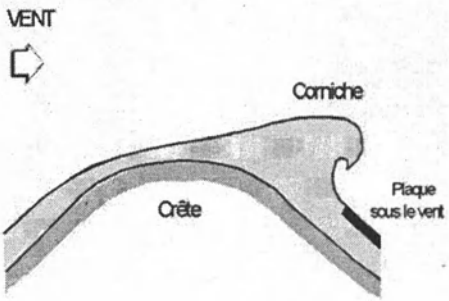
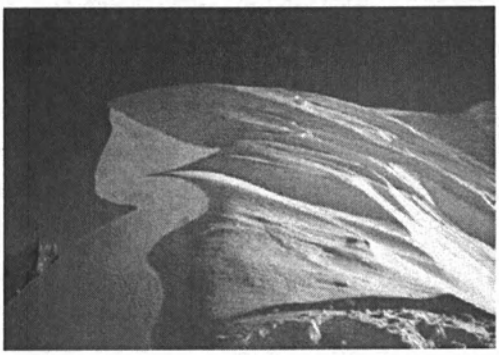


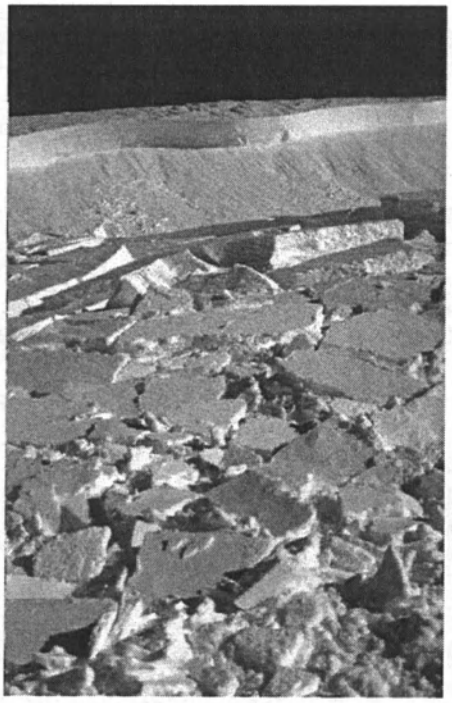
Figure 1 : principe de formation d'une corniche



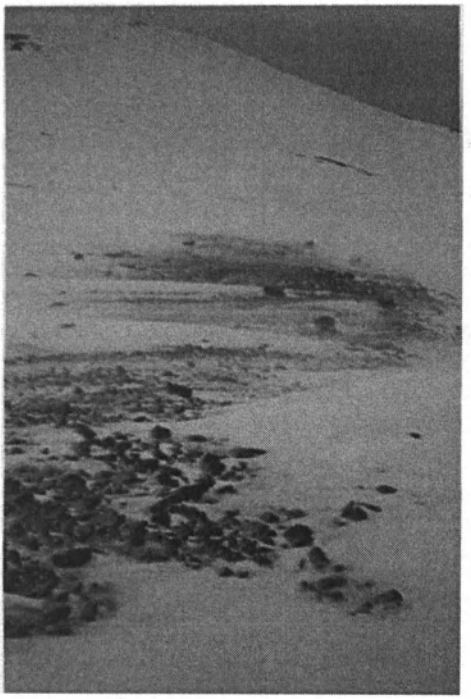
Photographie 1 : corniche (Cliché F.Valla/Cemagref)

A cette corniche est systématiquement associée plus bas une plaque sous le vent. En effet les grains de neige se déposent aussi dans la pente en aval. Ils se soudent entre eux par frittage en formant une plaque rigide qui ne peut plus évoluer *(figure 1)*. Sa rigidité ne lui permet pas de suivre le tassement de la strate inférieure créant ainsi des zones de décollement. La plaque ne tient alors que par ses ancrages latéraux *(rochers...)*. Des vents, dont la vitesse varie de 10 à 15 km/h, et soufflant sur de la neige fraîche et sèche, sont à l'origine de plaques à vent dangereuses. La plaque à vent est irrégulière en épaisseur : elle peut par exemple faire 3 m d'épaisseur au milieu d'une combe alors que sur les arêtes, elle n'a que 10 cm d'épaisseur.
La chute éventuelle de la corniche ou le passage d'un randonneur entraîne la plupart du temps la rupture de la plaque sous le vent *(photographie 2)*.
Dans les zones où il est accéléré, le vent balayera la neige et la déposera dans les

zones où il est ralenti. Dans les stations de ski, l'hétérogénéité du manteau neigeux *se traduit par des pistes ou des arrivées de remontées mécaniques trop peu enneigées (photographie 3) ou au contraire comblées par la neige.*



Photographie 2 : cassure de plaques et avalanche de plaques (cliché D.Daolio)



Photographie 3 : zone d'érosion au col du Lac Blanc (Alpe d'Huez) (cliché M. Roussel /Cemagref)

2. Transport de la neige par le vent dans des zones de plateau

Dans un contexte « plateau » où le relief est peu marqué, le transport de la neige par le vent pose surtout des problèmes de circulation routière. Les problèmes les plus courants sont le manque de visibilité et surtout la formation de congères.
Lors d'un épisode de transport, la concentration des particules de neige est très importante dans le premier mètre au dessus du sol entraînant une réduction de visibilité pour l'automobiliste. Puis, lorsque le vent faiblit, il dépose une partie de la neige transportée. Cette variation de vitesse du vent est généralement provoquée par le relief ou par des obstacles. L'accumulation de neige ainsi provoquée est appelée congère *(figure 2).*
D'importants problèmes de sécurité et déneigement *(photographie 4)* peuvent alors se poser aux responsables de l'Equipement ou aux gestionnaires de sociétés d'autoroutes.

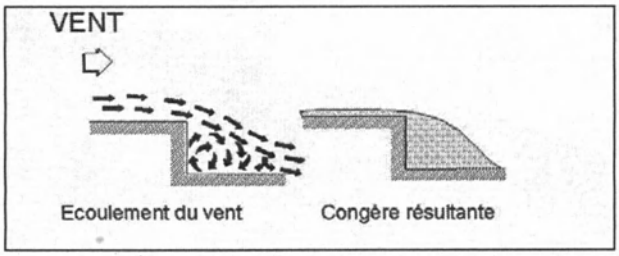
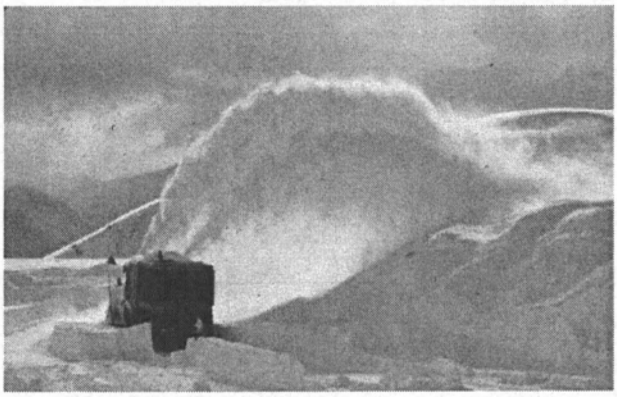
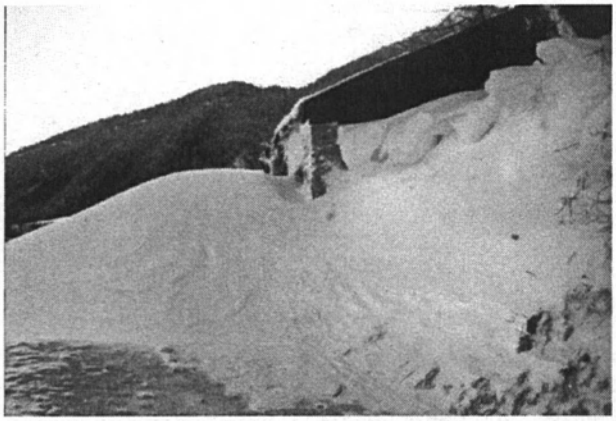


Figure 2 : principe de formation d'une congère

Le principe de formation des congères et des corniches est identique *(la neige soufflée se dépose dans les zones de décollement du fluide)* ; c'est le changement de pente, plus ou moins abrupt, qui fait que corniche ou congère se forment.
Les bâtiments sont des obstacles au transport de la neige par le vent ; ils sont aussi à l'origine de la formation de congères. Citons l'exemple d'un camp en Antarctique, où l'ensemble des congères générées par les constructions ne formait plus qu'une vaste accumulation de neige de 500 mètres sur un kilomètre. Sans faire appel à des cas extrêmes, des bâtiments mal conçus *(orientation, forme)* ou mal protégés *(absence de végétation ou, au contraire, végétation mal implantée)* sont à l'origine de congères qui perturbent leur utilisation *(obstruction des issues, des zones d'accès piétonnes ou routières, parkings inutilisables...) (photographie 5)*.



Photographie 4 : déneigement d'une route de montagne
(Cliché C.Charlier/Cemagref)



Photographie 5 : congère générée par un bâtiment (cliché F.Ousset/Cemagref)

Mais la formation d'accumulation n'est pas propre aux régions enneigées. Le même phénomène se produit lors du transport de sable par le vent *(photographie 6).*

Photographie 6 : risque de formation d'accumulations de sable dans le sud de la France (cliché F.Naaim/Cemagref)

La prise en compte de la formation des congères est donc une nécessité pour les différents exploitants du réseau routier. Cette prise de conscience est d'ailleurs fort ancienne puisque les premières recommandations concernant le transport de la neige par le vent ont été publiées dès la fin du siècle dernier *(figure 3).* Elles étaient destinées au personnel des chemins de fer, le problème étant sensible pour de nombreuses lignes, non seulement en France, mais aussi en Allemagne, en Russie et dans les pays scandinaves.

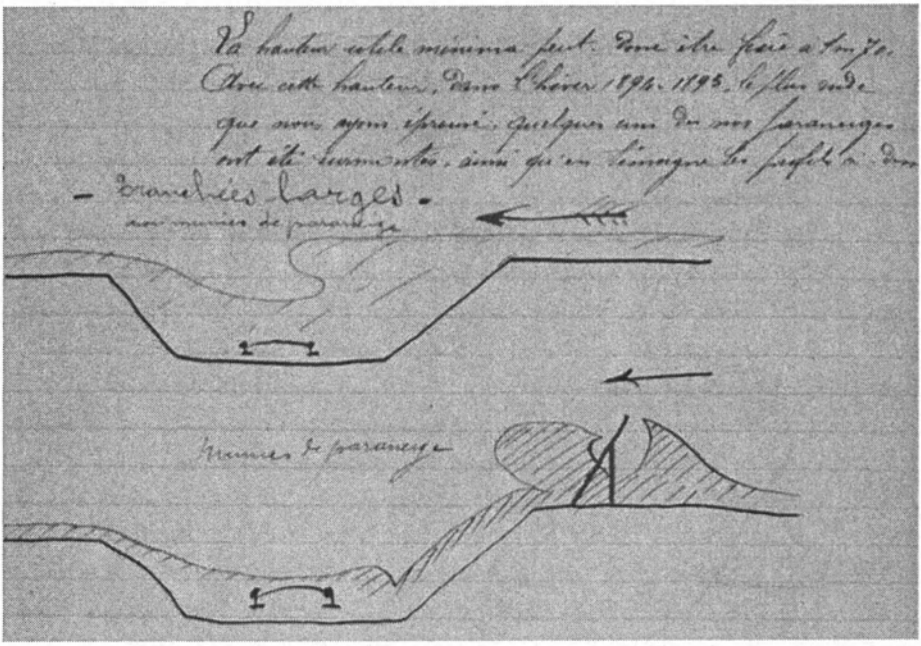


Figure 3 : extraits du rapport de M. Morard (1896) concernant les dispositifs pare-congères

Guidée tout d'abord par la nécessité de résoudre un problème pratique, la recherche dans le domaine du transport éolien de la neige est donc ancienne ; les premières modélisations physiques apparurent dès les années trente *(Finney)*.

Un siècle plus tard, il semble intéressant de faire le point sur l'état des connaissances, non pas du point de vue de l'ingénierie *(il existe à ce sujet un autre ouvrage "Transport de la neige par le vent : connaissances de bases et recommandations", 1992, F. Naaim-Bouvet, G. Brugnot),* mais du point de vue de la recherche. Ainsi, on s'intéressera tout d'abord aux processus physiques en jeu, en retraçant chronologiquement les différentes phases du déplacement de la particule de neige lors de son transport éolien, puis aux différentes modélisations visant à reproduire le comportement complexe de ces grains de neige.