

ACTES DE
COLLOQUE

Chamonix
30 mai - 3 juin 1995

ANENA

Les apports de la recherche
scientifique à la sécurité neige,
glace et avalanche

The contribution of scientific
research to safety with snow,
ice and avalanche



Cemagref
EDITIONS

**Les apports
de la recherche scientifique
à la sécurité neige, glace
et avalanche**

Actes du colloque
Chamonix, 30 mai - 3 juin 1995

Dans la même collection aux éditions du Cemagref (prix TTC)

- Recherche et société, 10 ans d'expérience du Cemagref, oct. 1991, Paris, ISBN 2-85362-256-8, 1991, 204 p. - 200 F
- Measures for success. Metrology and instrumentation in aquaculture management. Mesures pour le succès. Métrologie et instrumentation appliquées à la gestion en aquaculture, *Aquaculture Bordeaux 94*, ISBN 2-85362-373-4, 328 p. - 275 F

Équipements agricoles et alimentaires

- Equipements en production végétale et réduction des pollutions, 1994, ISBN 2-85362-405-6, 1995, 96 p. - 150 F
- Plastiques et environnement, 1994, ISBN 2-85362-396-4, 52 p. - 100 F
- Maîtrise et prévention des pollutions dues aux élevages, *SIMA 94*, Paris, ISBN 2-85362-349-1, 148 p. - 200 F
- La conduite autonome des engins agricoles, *SIMA 92*, Paris, ISBN 2-85362-266-5, 1993, 152 p. - 200 F
- L'application de l'analyse d'images dans l'agro-industrie. De la production à la transformation des produits agricoles, 28 sept. 1994, Montpellier, ISBN 2-85362-372-6, 144 p. - 180 F
- Use of on-machine vision systems for the agricultural and bio-industries. Systèmes de vision embarqués pour l'agriculture et l'industrie agro-alimentaire, sept. 1991, Montpellier, ISBN 2-85362-279-7, 1992, 176 p. - 200 F
- Atelier international sur les bases biologiques de l'aquaculture des siluriformes. International workshop on the biological bases for aquaculture of siluriformes, 1994, Montpellier, ISBN 2-85362-365-3, 194 p. - 150 F
- Dysfonctionnements biologiques dans les stations d'épuration en boues activées, 21 oct. 1994, Lyon, ISBN 2-85362-381-5, 82 p. - 200 F
- Congrès international sur le traitement des effluents vinicoles. International specialized conference on winery wastewaters, 20 - 24 juin 1994, Narbonne / Epervay, ISBN 2-85362-366-1, 296 p. - 200 F
- Du concept de BVRE à celui de zone atelier dans les recherches menées en eaux continentales, 1994, Paris, ISBN 2-85362-400-5, 228 p. - 200 F

Gestion des territoires

Équipement pour l'eau et l'environnement

- Proceedings of the "Pierre Beghin" international workshop on rapid gravitational mass movements. Actes de l'atelier international "Pierre Beghin" sur les mouvements gravitaires rapides, 1993, ISBN 2-85362-411-0, 1995, 356 p. - 280 F
- Workshop on subsurface drainage simulation models. Atelier sur les modèles de simulation du drainage, 4-5 sept. 1993, La Haye, ISBN 2-85362-338-6, 1993, 338 p. - 150 F
- Drainage agricole, fév. 1990, Le Caire, ISBN 2-85362-220-7, 1991, 340 p. - 220 F
- Agriculteurs, agricultures et forêts, 1994, Paris, ISBN 2-85362-414-5, 1995, 208 p. - 190 F
- Quelle mécanisation pour la forêt de demain ?, *SIMA 93*, Paris, ISBN 2-85362-324-6, 1993, 192 p. - 200 F
- Ressources naturelles et développement montagnard, *SAM 92*, Grenoble, ISBN 2-85362-310-6, 1993, 154 p. - 200 F
- Montagne = Qualité ?, *SAM 92*, Grenoble, ISBN 2-85362-332-7, 1993, 68 p. - 150 F
- Territoires ruraux et développement. Quel rôle pour la recherche, 28 avril 1994, Paris, ISBN 2-85362-367-X, 246 p. - 170 F
- Thermal remote sensing of the energy and water balance over vegetation in conjunction with other sensors. Télédétection infrarouge thermique des échanges énergétiques et hydriques de la végétation en combinaison avec d'autres capteurs, sept. 1993, La Londe Les Maures, ISBN 2-85362-371-8, 330 p. - 275 F

Gestion des milieux aquatiques

- ACIPENSER, colloque international sur l'esturgeon, oct. 1989, Bordeaux, ISBN 2-85362-208-8, 1991, 520 p. - 350 F

Actes du colloque **Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche**. 30 mai - 3 juin 1995. Coordination de l'édition : F. Sivardière - Suivi d'édition : V. Goulette.

Impression et façonnage : imprimerie Louis Jean, 05003 Gap - Diffusion : Cemagref-Dicova, BP 22, 92162 Antony Cedex et ANENA, 15 rue Ernest Calvat, 38000 Grenoble - Diffusion aux libraires : TEC et DOC Lavoisier, 19 rue de Provigny, 94236 Cachan Cedex - (c) Cemagref, ISBN 2-85362-424-2, dépôt légal 4^e trimestre 1995 - Prix : 200 F

**Les apports
de la recherche scientifique
à la sécurité neige, glace
et avalanche**

Chamonix, France
30 mai / 3 juin 1995

Colloque organisé par

L'ANENA

Association nationale pour l'étude
de la neige et des avalanches

Coordination scientifique

François SIVARDIÈRE
Directeur de l'ANENA

ANENA

*15, rue Ernest Calvat
38000 Grenoble, France
Tél. (33) 76 51 39 39 - Fax (33) 76 42 81 66*

Comité de lecture

Robert BOLOGNESI

Institut Fédéral pour l'Etude de la Neige et des Avalanches
Suisse

Gérard BRUGNOT

Division Nivologie du CEMAGREF
France

Eric BRUN

Centre d'Etudes de la Neige de Météo-France
France

Hansueli GUBLER

ALPUG
Suisse

Karstein LIED

Norwegian Geotechnical Institut
Norvège

Dave Mc CLUNG

Université de Colombie Brintannique
Canada

Giovanni PERETTI

AINEVA
Italie

Horst SCHAFFHAUSER

Institut für Lawinenkunde
Autriche

Joan Manuel VILAPLANA

Université de Barcelone
Espagne

ALLOCUTION D'OUVERTURE

Monsieur le Maire, Mesdames et Messieurs,

Pour la deuxième fois, la Mairie de Chamonix nous accueille cette semaine dans ses magnifiques locaux du Majestic. Qu'elle soit ici remerciée de mettre à notre disposition ce cadre à la fois grandiose et pratique, et particulièrement son maire, mon collègue et ami, Michel Charlet, Conseiller Général.

L'ANENA, Association Nationale pour l'Etude de la Neige et des Avalanches, fondée en 1971 a reçu pour but, entre autres, de "faciliter la concertation entre spécialistes et usagers et de promouvoir des échanges d'expériences et de connaissances avec les pays étrangers".

C'est donc dans ce cadre, que, quatre ans après la première édition, l'ANENA organise ce deuxième symposium international sur la neige et les avalanches. Son but est de permettre aux chercheurs et aux praticiens de tous pays de se rencontrer, de faire le point sur l'état actuel des connaissances et d'en envisager les applications concrètes, but ultime des recherches dans tous les domaines, mais plus encore dans celui de la sécurité des biens et des personnes face au risque d'avalanche.

Je vous remercie d'avoir répondu si nombreux à notre appel et vous souhaite donc la bienvenue à ce symposium. Votre présence en grand nombre et vos origines géographiques très variées, puisque 17 pays, et la plupart des grands massifs montagneux (Rocheuses, Andes, Carpates, Himalaya, Scandinavie et bien entendu les Alpes) sont représentés, devraient assurer à vos débats une très grande richesse d'expériences, et les rendre d'autant plus intéressantes.

Mais notre joie de nous retrouver réunis, pour échanger sur ce sujet qui nous préoccupe tous, est malheureusement et dramatiquement ternie par l'absence de l'un des vôtres, chercheur passionné qui travaillait à Lausanne et à Sion en Suisse sur le transport de neige par le vent. Thierry Castelle est mort il y a à peine un mois, en tombant dans une crevasse, sur un glacier de la Terre de Baffin, dans le Grand Nord Canadien. Il avait été le moteur de nombreuses collaborations nationales et internationales. Ceux qui l'ont côtoyés depuis 1987 se souviendront des longues discussions qu'ils ont eues avec lui : échanges d'idées, d'opinions, de résultats, partage d'expériences respectives. C'est cet état d'esprit qui doit être le votre toute cette semaine.

Avant de terminer, je voudrais remercier tous les organismes qui ont permis la réalisation de ce symposium, la Mairie et l'Office du Tourisme de Chamonix, la Commission Européenne DGXII, les Ministères de la Jeunesse et des Sports, des Affaires Etrangères et de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, ainsi que le Conseil Général de la Haute-Savoie.

Merci encore à vous tous d'être venus parfois de très loin, bonne semaine, bon travail, bon symposium !

Très cordialement



Jean-Guy CUPILLARD
Président de l'ANENA
Vice-Président du Conseil Général
de l'Isère
Maire d'Huez-Alpe d'Huez

Sommaire

Évolution des accidents d'avalanches en France de 1971 à 1994 <i>F. Sivardière, F. Valla</i>	13
Détection sismique appliquée à la caractérisation des avalanches <i>F. Sabot, P. Martinez, E. Suriñach, C. Olivera, J. Gavalda</i>	19
Analyse des caractéristiques des particules influençant le transport de la neige par le vent à partir des profils de concentration <i>H. Martinez, M. Naaim, M. Roussel</i>	25
Numerical model of powder snow avalanche. Theoretical analysis and application Modèle numérique d'avalanches poudreuses. Théorie et application <i>M. Naaim</i>	31
L'accord du Conseil de l'Europe « Eur-Opa risques majeurs » <i>F. Tondre</i>	37
Test of the snow cover numerical model CROCUS under a transitional snow climate with regards to operational avalanche forecasting Validation du modèle d'évolution du manteau neigeux CROCUS en prévision opérationnelle du risque d'avalanche sous un climat de transition <i>L. Mingo</i>	43
Modélisation de la répartition spatiale de la neige transportée par le vent dans le système ELSA <i>M. Mases, L. Buisson, W. Frey</i>	49
A model of powder snow avalanches Un modèle des avalanches poudreuses <i>P. Gauer</i>	55
Calculation methods for avalanche run-out distance for the Austrian Alps Méthodes de calcul des distances d'arrêt des avalanches dans les Alpes autrichiennes <i>K. Lied, C. Weiler, S. Bakkehøi, J. Hopf</i>	63
Détection sismique des avalanches : conception et validation d'un système pré-opérationnel <i>B. Leprettre, J.-P. Navarre, Y. Danielou, J.-M. Panel, A. Taillefer</i>	69

Utilisation des techniques d'imagerie pour la cartographie des vitesses à la surface d'une avalanche de neige dense <i>F. Granada, P. Villemain, O. Marco</i>	75
Modélisation des avalanches poudreuses : possibilités d'utilisation dans le cadre d'un zonage réglementaire des risques naturels <i>P. Bouvet, Y. Cassayre, C. Charlier, O. Marco, M. Naaim</i>	83
Snow hazard information system in Slovenia Système d'information sur le hasard d'avalanches en Slovénie <i>A. Horvat</i>	89
PROTEON - Vers une prévision locale du transport de neige par le vent <i>G. Guyomarc'h, L. Merindol</i>	97
Project of elaboration of a cadastre of avalanche paths in the catalan Pyrenees Projet d'élaboration d'un cadastre de localisation d'avalanches dans les Pyrénées catalanes <i>G. Marti, P. Oller, B. Bisson, J. Gavalda, J. Garcia, P. Martinez</i>	103
Bulletin avalanche et communication assistée par ordinateur : premières réalisations <i>R. Bolognesi, F. Guillaud</i>	109
Prévision locale du risque d'avalanches à La Plagne <i>C. Schneider</i>	119
Spatial and time variability of avalanche predictors and accuracy of their estimations La variabilité spatiale et temporelle des prédicteurs des avalanches et précision de leur estimation <i>P. Chernouss</i>	123
Concept suisse pour la prévision du danger d'avalanches <i>W.J. Ammann</i>	129
Avalanche activity during major avalanche events, a case study for hydroelectric reservoirs Activité avalancheuse majeure : étude du cas des barrages hydro-électriques <i>M. Schaer</i>	133
Prévision locale du risque d'avalanches. Alpe D'Huez, domaine des Grandes Rousses <i>J.-M. Daultier</i>	139

MEPRA et le risque de déclenchement accidentel d'avalanches <i>G. Giraud, J.-P. Navarre</i>	145
Verification of avalanche danger with respect to avalanche forecasting Vérification du danger d'avalanche par rapport aux prévisions du risque d'avalanche <i>P. M.B. Föhn, J. Schweizer</i>	151
La prévision départementale du risque d'avalanche : l'exemple de l'Isère <i>J. Villecrose</i>	157
Meteorological and snow conditions, avalanches and safety in Bulgarian mountains Nivométéorologie, avalanches et sécurité dans les montagnes bulgares <i>M. Mikhnevsky</i>	163
Premiers éléments pour une prévision numérique du risque d'avalanche au cours de la journée du lendemain <i>Y. Durand, L. Merindol, S. Michoud</i>	169
Limits of wind-tunnel modeling of snow accumulations Intérêts et limites de la modélisation physique en soufflerie du transport de neige par le vent <i>F. Naaim-Bouvet</i>	177
Avalanches : prévisibles ou imprévisibles ? <i>R. Lambert</i>	183
Avalanches d'été, avalanches d'automne, un risque méconnu <i>J.-P. Zuanon</i>	187
Bilan d'une enquête sur les déclencheurs à gaz (GAZEX) <i>F. Rapin, O. Carsana</i>	193
An integrated system for artificial avalanche control Un système intégré pour le contrôle des avalanches artificielles <i>H. Gubler</i>	201
Modélisation de la réflectance de la neige du visible au proche infrarouge. Comparaison avec des mesures en laboratoire. Application à la télédétection <i>C. Leroux, J. Lenoble, C. Sergent, M. Fily, J.W. Hoviener</i>	207
Snow gliding measurements in subalpine forests and on alpine pastures Mesures de glissement de la neige dans les forêts subalpines et les pâturages alpins <i>P. Höller</i>	213

Measurements on avalanche dynamics a new installation Nouvelle installation pour des mesures sur la dynamique des avalanches <i>L. Rammer</i>	219
Quelques orientations nouvelles de la cartographie numérique des avalanches <i>G. Borrel</i>	227
Effet d'une digue sur l'écoulement d'un aérosol <i>A. Auge, F. Ousset, O. Marco</i>	235
Snow pressure measurements on snow net systems Mesures de la pression exercée par la neige sur les filets paravalanches <i>S. Margreth</i>	241
Dynamique des avalanches. Présentation du site expérimental du Col du Lautaret (Hautes-Alpes) <i>F. Ousset, O. Marco, J.-M. Taillandier</i>	249
Ancrages par pieux exposés : améliorations techniques <i>P. Bouvet, G. Mazzoleni, F. Rapin</i>	255
Détection acoustique des avalanches. Site La Sionne-Anzère, Valais, Suisse <i>V. Chritin, M. Rossi</i>	261
Avalanche frequency at Roger's Pass, British Columbia, Canada Fréquence des avalanches au Roger's Pass, Colombie Britannique, Canada <i>M.J. Smith, D.M. McClung</i>	267
Étude du risque d'avalanches dans la partie centrale des Pyrénées espagnoles (région aragonaise) <i>M^e Teresa Sáez Alagón, S. Rios Aragiús</i>	273
Détermination de la résistance mécanique de la neige à l'aide du Pandalp <i>D. Daudon, E. Flavigny, S. Borel, R. Gourves, Y. Page</i>	277
Méthodologie pour l'étude des plaques de neige à partir de données nouvelles <i>A. Duclos, R. Bolognesi</i>	283
Étude expérimentale des paramètres optiques de la neige. Réflectance directionnelle hémisphérique (domaines spectraux 400/1000 nm et 800/1600 nm) <i>C. Sergent, E. Pougatch, M. Sudul, B. Bourdelles, C. Leroux, H. Cachier</i>	291
Experimental investigations on the effectiveness of avalanche balloons Étude expérimentale de l'efficacité des ballons avalanche <i>F. Tschirky, R. Meister, W. Ammann, O. Buser, W. Caviezel, M. Hiller</i>	299

Skier triggered slab avalanche release - some practical implications Déclenchement des avalanches de plaques par les skieurs : quelques implications pratiques <i>J. Schweizer, C. Camponovo, C. Fierz, P. M.B. Föhn</i>	309
The effects of temperature on fracture of dry alpine snow Les effets de la température sur le processus de fracturation dans la neige sèche <i>D.M. Mc Clung</i>	317
Evaluation probabiliste de la stabilité du manteau neigeux des pentes de montagne Probabilistic evaluation of snow cover stability on mountain slopes <i>P. Chernouss</i>	323
La neige dans les Andes chiliennes et ses risques naturels <i>G. Ugarte G.</i>	329
« Prediction of slushflow hazard ». Objectives and procedures of an ongoing research project in Rana, North Norway Prédictions des écoulements de neige saturée d'eau. Objectifs et déroulement d'un projet de recherche en cours à Rana, Norvège du Nord <i>E. Hestnes, S. Bakkehøi</i>	335
Radiometer for the detection of avalanche victims Radiomètre pour la détection des victimes d'avalanches <i>M. Šval</i>	341
Évaluation de l'impact d'un changement du climat sur l'enneigement des Alpes françaises <i>E. Martin, E. Brun, Y. Durand</i>	347
<hr/> Liste des participants <hr/>	353

Évolution des accidents d'avalanches en France de 1971 à 1994

F. Sivardière, F. Valla¹

RÉSUMÉ

Depuis sa création en octobre 1971, l'ANENA enregistre les accidents graves d'avalanches, qui font l'objet d'articles de presse et de déclarations aux organismes publics de secours en montagne (PGHM, CRS des Alpes).

Ainsi, entre octobre 1971 et septembre 1994 (soit 23 hivers), 857 accidents (37 par an en moyenne) ont été enregistrés, concernant plus de 2 500 personnes emportées. 1 115 ont été ensevelies, 588 ont été blessées et 670 ont été tuées (soit en moyenne 30 par an).

ABSTRACT

Since the founding of the ANENA, at the end of 1971, all the heavy avalanche accidents are recorded in France with the maximum of information.

The present work treats 857 accidents during the period October 1971 to September 1994. In 23 winters, more than 2 500 people were recorded caught by avalanches, with 670 killed and 588 injured. It represents, on average, 37 accidents per year and 30 deaths per year.

INTRODUCTION

Notre échantillon ne concerne que les accidents graves parvenus à notre connaissance par les comptes rendus des organismes de secours ou les coupures de presse. Il est à peu près sûr que toutes les victimes décédées sont recensées, mais il est certain que des accidents qui se sont bien terminés ne sont pas comptabilisés. Diverses enquêtes (CEMAGREF-1982) permettent de penser qu'il se produit peut être deux fois plus d'accidents que le chiffre enregistré. Par contre, on peut à juste titre penser que les statistiques sur les victimes décédées dans les avalanches sont représentatives de la situation en France. Par rapport à nos voisins alpins (Suisse, Italie, Autriche), notre tribut payé aux avalanches (F.Valla 1987) est du même ordre.

Les chiffres que nous possédons pour les hivers 1969-70 et 1970-71 ne sont pas pris en compte car trop d'informations sont manquantes. Signalons quand même que pour l'hiver 1969-70 seuls 9 accidents ont été recensés avec 57 victimes mortes et 62 blessés. En effet, la catastrophe de Val d'Isère s'est produite le 10 février 1970 avec un triste bilan de 39 morts. La saison 1970-71 compte dans nos archives 10 accidents avec 17 morts et 20 blessés. Après l'automne 1971 la collecte systématique des données relatives aux accidents d'avalanches a été mise en place par l'ANENA.

Ainsi, on déplore en 23 ans, d'octobre 1971 à septembre 1994, 857 accidents graves. Le nombre de personnes emportées s'élève à environ 2 600. Le nombre des victimes décédées est de 670, soit approximativement 25 %. Les blessés sont 588 soit 22 % environ. Une personne emportée sur deux est donc indemne.

Les valeurs moyennes sur 23 hivers sont donc les suivantes :

- 37 accidents graves ;
- 110 personnes emportées environ ;
- 30 personnes décédées ;
- 26 personnes blessées.

¹ ANENA, 15 rue Ernest Calvat, F - 38000 Grenoble, Tél : (33) 76-51-39-39
Fax : (33) 76-42-81-66

1. Les accidents de 1971 à 1994 et leur répartition géographique

La figure 1 présente le nombre d'accidents et le nombre de victimes mortes au cours des deux dernières décennies avec les années 1969-70 et 1970-71 très certainement incomplètes. On remarque tout de suite la forte variabilité de ces chiffres d'une saison à l'autre. L'amplitude de variation de ces accidents est de 1 à 5. En effet, "les hivers se suivent mais ne se ressemblent pas", a-t-on l'habitude de dire. Les conditions nivométrologiques combinées aux périodes de vacances (fréquentation accrue) expliquent ces variations qui prennent une forme vaguement périodique liée à la climatologie.

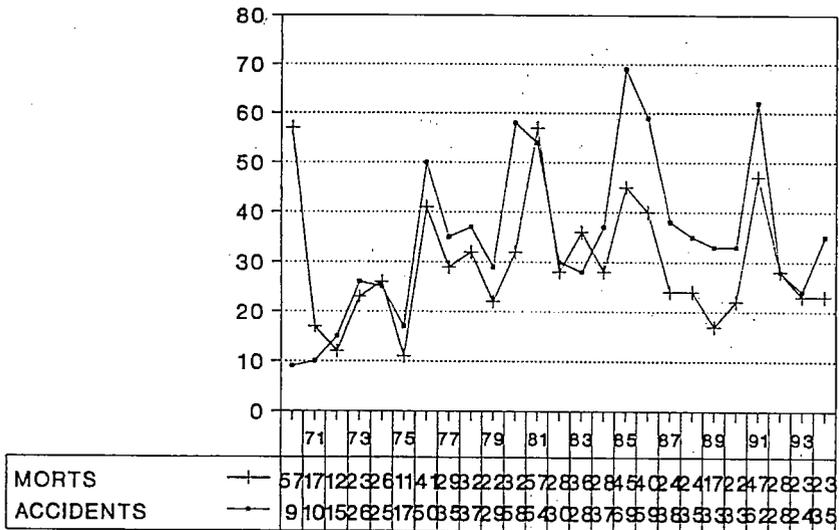


Figure 1 : Evolution du nombre d'accidents et de morts par avalanches en France (1970-1994)

En France, les avalanches concernent principalement les Alpes et les Pyrénées, mais il se produit aussi des accidents dans des régions enneigées moins montagneuses comme dans le Massif Central, les Vosges ou le Jura. Près de 20 départements entrent dans nos statistiques. Les accidents sont annuels seulement dans 7 départements, la Savoie et la Haute-Savoie détenant les chiffres records.

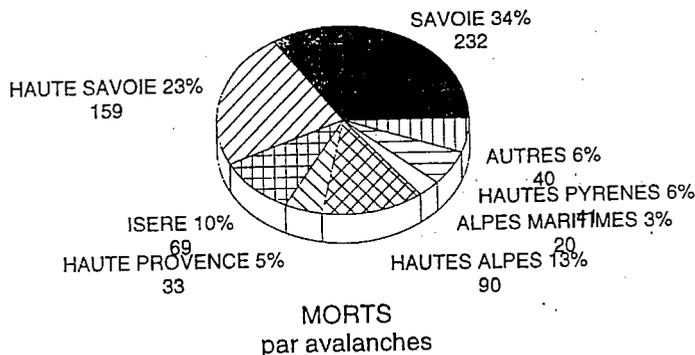


Figure 2 : Répartition des décès par accident d'avalanche par département (1972-1994)

Plus de la moitié des accidents et des morts concerne les "Alpes du Nord", principalement les massifs du Mont Blanc, Vanoise, Maurienne et Tarentaise (Savoie + Haute-Savoie). Ceci est en rapport direct avec la fréquentation hivernale qui est très forte tant au niveau des stations de ski (hors-pistes) qu'au niveau du ski de montagne.

2. Répartition par type d'activités

On distingue deux grandes catégories :

- les activités récréatives : ski de montagne, ski hors-pistes, alpinisme, ski de piste ;
- les activités non récréatives : voies d'accès, habitation, divers.

Les activités récréatives concernent la quasi totalité des accidents et des morts (95 %) (figure 3) : un mort sur deux était en train de faire du ski de montagne et un sur trois du ski hors-pistes.

L'évolution montre que les accidents et les décès touchent de plus en plus les activités récréatives et de moins en moins les activités non récréatives.

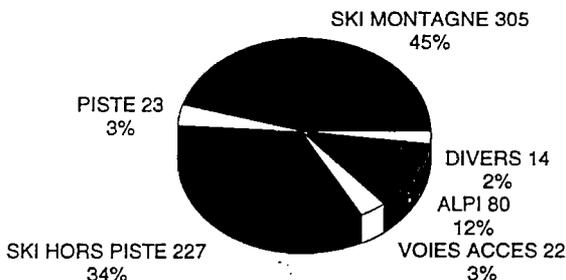


Figure 3 : Répartition des décès par accident d'avalanche par activité (1972-1994)

En fonction des activités, les accidents sont plus ou moins mortels. Ce fait provient en grande partie de la rapidité avec laquelle les ensevelis sont secourus. Il nous a paru significatif de représenter le "taux de mortalité" (rapport du nombre de morts au nombre d'accidents) pour chacune des activités. On constate (figure 4) que l'alpinisme et le ski de montagne ont un taux de mortalité voisin de 1, dû à la lenteur de l'alerte et à l'éloignement des postes de secours. Pour le ski hors-pistes et le ski de piste, le taux est divisé par deux (alerte et secours presque immédiats). Pour les voies d'accès, le taux faible pourrait s'expliquer par la relative protection qu'offrent véhicules contre le risque d'asphyxie.

Enfin, pour les habitations le taux relativement élevé peut être expliqué par le fait que les avalanches touchant des maisons sont de très grande ampleur et donc plus puissantes et plus meurtrières.

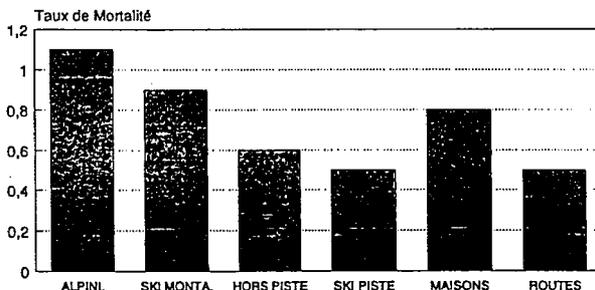


Figure 4 : taux de mortalité des accidents d'avalanche par type d'activités des victimes

3. Ski de montagne et ski hors-pistes

3.1 Ski de montagne

Il s'agit du ski pratiqué en montagne avec un équipement spécial (peaux de phoques, fixations à débattement, ARVA, pelle, sonde).

Les valeurs annuelles varient fortement d'une année à l'autre. En moyenne, il y a 14 accidents et 13 décès.

La tendance montre une légère diminution des décès depuis 1985 (figure 5).

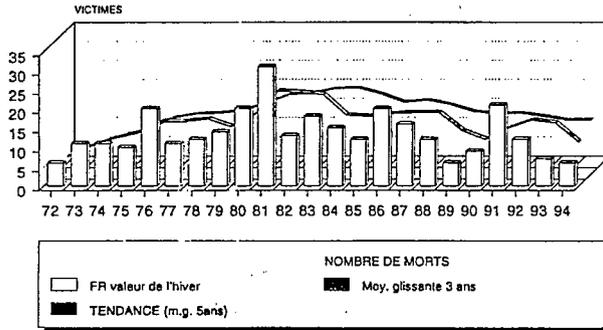


Figure 5 : Evolution du nombre de décès par accident d'avalanche dans la pratique du ski de montagne (1972-1994)

Compte tenu du fait que la fréquentation, difficile à estimer, a certainement augmenté, il semble que les campagnes de sensibilisation (prévention, information, ARVA) n'aient pas été inutiles.

3.2 Ski hors-pistes

Il s'agit du ski pratiqué hors du domaine balisé des stations, à partir des remontées mécaniques, avec le même matériel de ski que pour la piste. La France est le pays alpin où ce sport est le plus en vogue. Nombreux sont les étrangers qui viennent le pratiquer dans nos stations qui ont la réputation justifiée de posséder les plus beaux domaines de ski hors-pistes. Ce fait explique que la France détienne le record des accidents (F. Valla - 1987).

La figure 6 montre l'évolution des décès concernant cette activités au cours des 23 années étudiées.

Les valeurs moyennes annuelles sur la périodicité étudiée sont de 16 accidents pour 10 morts.

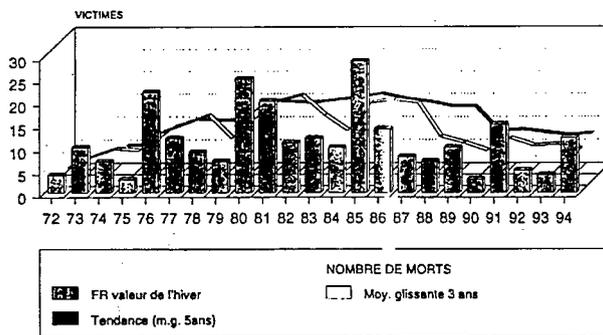


Figure 6 : Evolution du nombre de décès par accident d'avalanche dans la pratique du ski hors-pistes (1972-1994)

Là aussi, la tendance est à une certaine diminution qui ne peut qu'encourager les responsables pédagogiques et les responsables de service de sécurité des stations dans la poursuite de leur travail.

4. Les moyens de localisation des ensevelis

Les victimes d'avalanches sont retrouvées grâce à toute une panoplie de moyens. Les plus connus sont le chien d'avalanche (équipe cynophile), les sondages et aujourd'hui les ARVA. Nous traiterons séparément les victimes trouvées vivantes et les victimes décédées (figure 7). Pour les victimes vivantes, 17 % s'en sortent toute seules car elles sont à peine recouvertes de neige et conscientes. Les indices extérieurs (émergence d'une partie du corps) permettent à 17 % d'être sauvées alors que les chiens (délais d'intervention toujours longs) en retrouvent 11 %. Le chiffre intéressant est celui relatif aux ARVA, 19 % des ensevelis sont localisés grâce à eux.

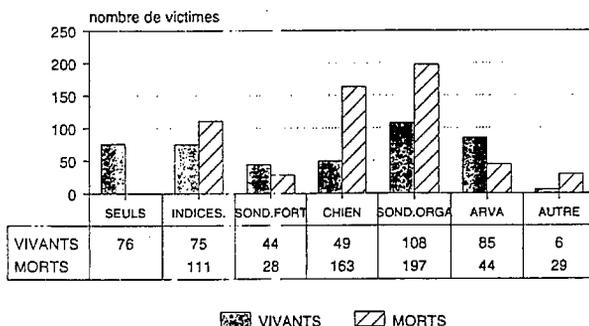


Figure 7 : Répartition des moyens de détection des victimes ensevelies d'accidents d'avalanches (1972-1994)

Pour les victimes découvertes mortes, comme on peut s'y attendre, les sondages organisés (44 %) et les chiens (28 %) permettent de retrouver plus de la moitié des victimes (prospection exhaustive de l'avalanche mais délais d'intervention longs). Ici encore, les ARVA sont à mentionner avec seulement 7 % (les porteurs d'ARVA sont souvent sauvés).

Dans la comparaison des différents chiffres bruts, il faut prendre garde au fait que les techniques de localisation ne sont pas toutes utilisées depuis la même date. En particulier, les ARVA sont apparus à la fin des années 1970 et leur usage ne s'est développé qu'au cours des années 1980.

CONCLUSIONS

Cette étude qui traite de 23 années de statistiques d'accidents d'avalanche en France montre qu'il règne, dans le domaine, une certaine stabilité, voire une diminution, en dépit d'une augmentation conséquente de la fréquentation de la montagne.

Les deux secteurs d'activité les plus touchés sont le ski de montagne qui totalise la moitié des victimes décédées et le ski hors-pistes avec le tiers.

Géographiquement, les Alpes du Nord sont les plus concernées, comme les chiffres de fréquentation pouvaient le laisser supposer. La majorité des avalanches sont des plaques déclenchées par les victimes elles-mêmes.

Enfin, l'utilisation des ARVA depuis une dizaine d'année se manifeste dans les statistiques. Un nombre croissant de victimes est retrouvé en vie grâce à ce petit émetteur. C'est une constatation réjouissante.

Pour les responsables qui oeuvrent pour une meilleure prise en compte du risque avalanche en montagne, cette étude montre que la prévention et l'information commencent à porter leurs fruits.

REMERCIEMENTS

Cette étude n'a été possible que grâce à la constance, pendant plus de vingt années, de ceux qui collectent les renseignements relatifs aux accidents d'avalanche. Merci aux sauveteurs, aux équipes cynophiles, aux CRS et Gendarmes de montagne ainsi qu'au personnel de l'ANENA pour la centralisation des données.

BIBLIOGRAPHIE

Valla (F.), Tuailon (JL.), 1991 - Accidents d'avalanches en France, statistiques des années 1970-1990, *Actes du symposium ANENA-CISA-IKAR*, juin, pp 8-16.

Valla (F.), 1987 - Accidents d'avalanches dans les Alpes au cours de la décennie 1975-1985. *AIHS Publication* 162, pp 647-652.

Détection sismique appliquée à la caractérisation des avalanches

F. Sabot¹, P. Martinez², E. Suriñach¹,
C. Olivera², J. Gavalda²

ABSTRACT

The interpretation of seismic signals of avalanches allows us to characterize the avalanche phenomena in areas where human observation is not possible. To this end, a field experiment allowing the automatic acquisition of signals has been in progress in the Pyrenees since 1988.

The selection and analysis of the data were done by correlating the avalanche seismic signals and the meteorological data, which permits the separation of the signals from other phenomena. The characterisation of the selected signals was carried out with different methods of temporal and spectral analyses. Moreover, the study of the particle movement permits the determination of the signal source and as a result the location of the channel where the phenomenon was produced.

To provide further information about these signals, it is necessary to obtain seismic data and video images corresponding to artificially released avalanches

RESUME

Dans les zones éloignées de toutes observations humaines, l'interprétation des signaux sismiques d'avalanches peut permettre la caractérisation des phénomènes avalancheux. Pour cela un processus expérimental a été mis en place dans les Pyrénées depuis 1988 permettant l'acquisition automatique des signaux.

Le dépouillement et l'analyse des données, a consisté tout d'abord en une corrélation des enregistrements des signaux d'avalanches avec les données météorologiques afin d'ôter les signaux provenant d'autres phénomènes. Grâce à différentes méthodes d'analyse temporelle et spectrale, une caractérisation des signaux restants a été obtenue. En même temps, l'étude du mouvement de la particule a permis de déterminer la provenance du signal et par conséquent le couloir où s'est produit le phénomène.

Afin d'approfondir l'étude de ces signaux, il est nécessaire d'obtenir simultanément les données et la vidéo du phénomène et donc de réaliser des déclenchements artificiels.

INTRODUCTION

D'après Norris (1994) les signaux produits par les avalanches de neige sont similaires à ceux produits par la chute de gros rochers et peuvent être étudiés de la même manière. Afin d'étudier ces signaux selon les méthodes sismiques existantes deux procédés d'acquisition ont été mis en place dans les Pyrénées.

¹ Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia. Universitat de Barcelona. Martí i Franques s/n. 08028 Barcelona. Spain. Tel. 34.3.4021375; Fax: 34.3.4021340

² Servei Geològic de Catalunya. Av. Paral·lel 71, 08001 Barcelona. Spain. Tel. 33.3.4416202; Fax: 34.3.3293996

A partir de ces signaux, une corrélation avec les données de météorologie permet de mettre en évidence les épisodes actifs directement liés à certaines situations météorologiques. L'étude temporelle et spectrale permet de discriminer les signaux d'avalanche des signaux provenant d'autres phénomènes (comme les signaux de tempêtes, d'explosion ou de séisme). Enfin, deux méthodes sismologiques pour déterminer les différentes ondes composant le signal sont mises en oeuvre.

1. ACQUISITION DES SIGNAUX

Afin d'obtenir des données dans de bonnes conditions, tout en utilisant l'équipement standard d'une station sismique, il a été mis en place deux systèmes d'acquisition : l'un automatique et l'autre consistant à enregistrer les signaux produits lors d'un déclenchement artificiel d'avalanche.

Matériel standard composant une station sismique

- Un sismométrie de période courte (1s).
- Un système de détection automatique ou manuel qui peut enregistrer les trois composantes du signal. La détection automatique est déclenchée selon un algorithme STA/LTA pour un niveau de mouvement du sol. Un dispositif de gain automatique permet d'obtenir l'information sans saturer le signal.
- Un système de temporisation : DCF ou MSF.

L'enregistrement s'obtient sur bande magnétique et à l'aide d'une unité de reproduction les données sont visualisées sous forme analogique et digitale.



figure 1 : les différents sites d'enregistrement

Enregistrement automatique

Les données sont acquises à l'aide d'une station PDR1 de Kinematics du Servei Geològic de Catalunya (S.G.C.) installée depuis 1988 à Varrados (fig. 1) vallée encaissée du Val d'Aran (entre 1000 et 2300 mètres d'altitude), qui se trouve isolée dès les premières chutes de neige. Ce système d'acquisition nous a permis d'enregistrer des signaux sismiques d'avalanche à une composante de 1988 à 1991 puis à trois composantes de 1992 à 1994 ce qui représente un total de 200 signaux.

Déclenchement artificiel

Mis à part les signaux obtenus par la méthode d'acquisition automatique, il est indispensable de corréler la dynamique de l'avalanche avec les différentes phases du signal. Pour cela, il est nécessaire d'obtenir simultanément les signaux d'avalanche et un film vidéo de cette dernière, ceci n'est possible que si les avalanches sont déclenchées artificiellement. A cette fin deux sites Núria et Boi Taüll (fig. 1) ont été choisis.

Núria est une station de ski à l'est des Pyrénées catalanes à une altitude comprise entre 2000 et 2400 mètres. Les avalanches sont déclenchées à l'aide d'un canon avalancheur dans un cirque possédant plusieurs couloirs qui convergent en fin de trajectoires. La station de Boi Taüll, quant à elle, est située au centre des Pyrénées catalanes entre 2200 et 2500 mètres d'altitude. Les avalanches sont déclenchées grâce à une charge d'explosif. La zone d'avalanche où se réalisent les expériences est un couloir dont les parois sont ravinées et ont une orientation Nord Ouest. L'acquisition manuelle des signaux est effectuée à l'aide de trois stations sismiques portables LENNARTZ de l'Université de Barcelone (chacune d'elles étant composée d'un sismomètre à trois composantes, d'un système DCF et MSF permettant d'obtenir le signal temporel et d'un magnétophone de haute résolution). Le 26 avril 1995, une expérience de déclenchement artificiel a été réalisée, mais les signaux enregistrés n'ont pas encore été étudiés.

2. CORRELATION ENTRE LES DONNEES METEOROLOGIQUES ET LES SIGNAUX

Pour des données acquises automatiquement, nous avons recueilli les données de température, d'humidité et de chute de neige auprès de la station météorologique (à 1800 mètres d'altitude) la plus proche de Varrados. Ceci nous a permis de mettre en évidence deux types de comportement. D'une part, les avalanches de neige récente produisent un grand nombre de signaux (le 21/12/94 par exemple), d'autre part d'autres signaux sont enregistrés lorsque la température augmente (fig. 2 : les 27, 28 et 29 décembre) ce qui a augmenté la fusion du manteau neigeux et provoqué les trois avalanches.

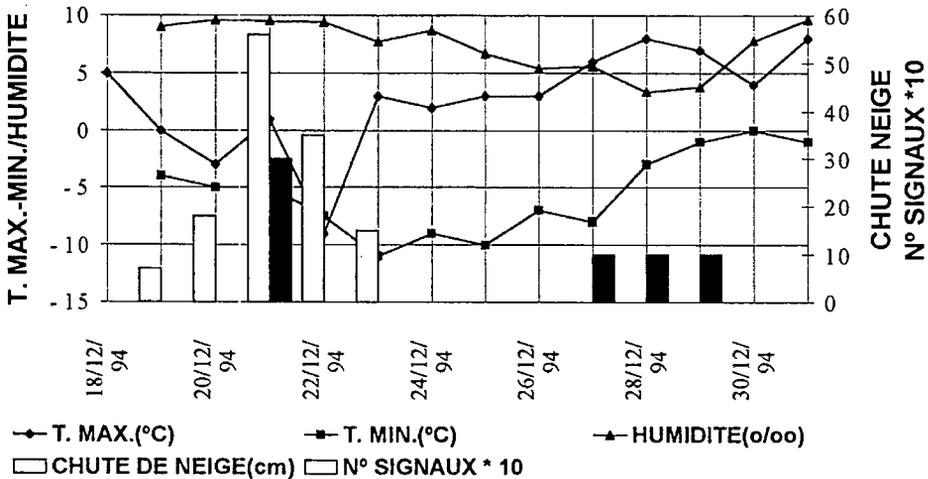


figure 2 : Corrélation entre les données météorologiques et les signaux

3. ANALYSE TEMPORELLE ET SPECTRALE

Sur l'ensemble des signaux obtenus lors des sept années d'acquisition, il est nécessaire d'extraire tous les signaux émanant d'autres phénomènes (séismes, tempêtes, explosions). Les signaux de tempêtes et d'épisodes de vent peuvent être ôtés à l'aide d'une analyse temporelle, car ils semblent produire un

fort bruit de fond. Enfin, les signaux de séismes et d'explosions peuvent être éliminés grâce à une analyse spectrale.

Analyse Temporelle

Une analyse des données a été effectuée pour essayer de mettre en évidence les similitudes de formes, de durées, d'amplitude, etc. Mais celle-ci n'a pas fourni une classification satisfaisante car les signaux diffèrent beaucoup entre eux.

Les premiers résultats concernant l'analyse des signaux trois composantes montrent que les composantes Est et Nord possèdent beaucoup plus d'énergie que la composante verticale, cela pourrait être lié aux forces de friction mises en jeux lors du mouvement de la masse de neige.

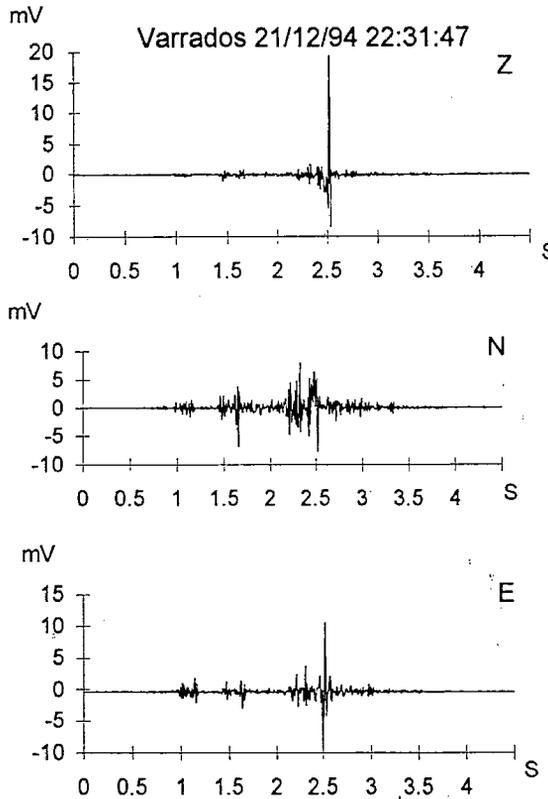


figure 3 : exemple de signal d'avalanche

Analyse Spectrale

Cette analyse, permettant de mettre en évidence la répartition spectrale d'énergie des signaux, est un bon critère de discrimination entre les signaux d'avalanches et les signaux provenant de séismes ou d'explosions. En effet les signaux d'avalanche possèdent une bande de fréquence (fig. 4a) entre 15 et 45 Hz (St Lawrence et al, 1976) alors que les signaux sismiques ont une bande de fréquence beaucoup plus faible puisqu'elle se situe entre 0 et 30 Hz.

Les signaux recueillis sont de fréquence relativement élevée car la station est située à proximité des couloirs et car les avalanches que nous enregistrons sont de tailles moyennes. Ceci explique la différence entre ces signaux et ceux étudiés par le centre d'étude de la neige (Navarre et al, 1991).

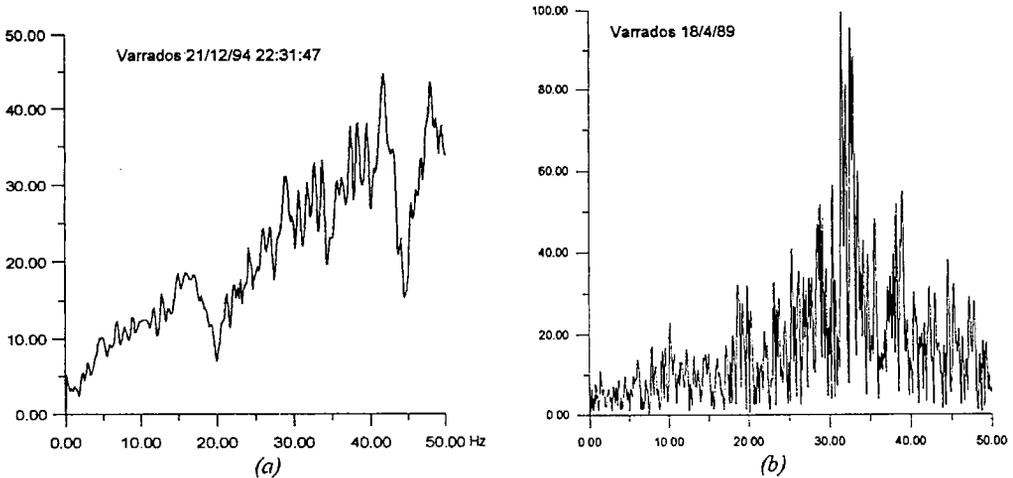


figure 4 : transformée de fourier de la composante verticale (Z)

Les spectres des signaux d'avalanche peuvent être regroupés en deux classes : les spectres qui ont une fréquence principale (fig. 4 b) et ceux dont l'amplitude croît en fonction de la fréquence. Le manque d'observation (film vidéo et signal de l'avalanche) ne nous permettent pas encore de dire si ces classes sont significatives de la morphologie de l'avalanche ou de la morphologie du terrain.

4. ETUDE DU MOUVEMENT DE LA PARTICULE

Les déformations élastiques de la croûte terrestre se propagent sous forme d'ondes sismiques. Ces dernières sont de trois types : les ondes longitudinales (P car ce sont les premières qui parviennent à la station), les ondes transversales (S pour seconde) et les ondes de surface (de Rayleigh et de Love). De plus les ondes subissent une atténuation d'autant plus rapide que la fréquence est élevée. En pratique seules les ondes issues de sources proches contiennent des hautes fréquences ce qui est le cas pour les signaux d'avalanche que nous enregistrons. Le géophone lors de l'acquisition des données est orienté pour enregistrer les trois composantes (Nord-Sud, Est-Ouest, verticale) du signal.

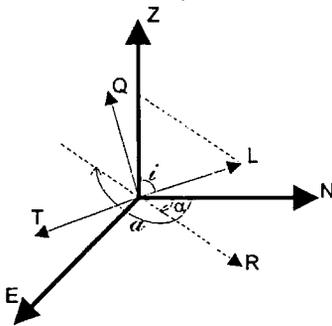


figure 5 : les systèmes de coordonnées de la décomposition

Afin de déterminer les groupes d'ondes composant le signal, il faut changer de système de coordonnées, et travailler avec un repère local. Ce dernier, permet d'orienter l'axe L dans la direction Station-Hypocentre (source du signal). Avec ce repère (fig. 5) les ondes P se propagent dans la direction L et les ondes S dans le plan (Q, T). La matrice de changement de repère se calcule (Plesinger, 1986) grâce à différents opérateurs qui fournissent l'azimut et l'angle d'incidence. En appliquant cette méthode aux signaux d'avalanche l'azimut obtenu permet de déterminer la direction Source-Station.

Une fois obtenue la direction Source-Station, il est nécessaire d'évaluer la distance qui sépare ces deux points. Des études sismologiques ont montré que la distance Station-Hypocentre est égale en

kilomètres à : $(T_S - T_P) \times C$ où T_P est le temps d'arrivée de l'onde P et T_S le temps d'arrivée de l'onde S. C est une constante dépendant de la vitesse de propagation des ondes P et S ($4 < C < 8$). Cette méthode peut être appliquée sur les signaux d'avalanche pour obtenir approximativement la source du signal en prenant pour temps d'arrivée de P et S les temps d'arrivée de deux premières impulsions. Il faut être prudent dans l'estimation de cette distance car, contrairement aux séismes, les avalanches détectées sont proches (à cause du contenu en fréquences) et une petite erreur dans les temps d'arrivée des ondes peut fausser la détermination du couloir.

Dans la vallée de Varrados, la cartographie des zones probables d'avalanche a été réalisée par le S.G.C. (en 1988). Pour les signaux trois composantes enregistrés, il est possible de déterminer la direction Station-Signal et, en supposant C égal à 5, de calculer la distance entre ces deux points. Ainsi, à l'aide de la carte des zones probables d'avalanche, des couloirs peuvent être identifiés. Ces derniers semblent coïncider avec les observations de terrain.

5. CONCLUSION

Bien que l'étude temporelle des signaux n'ait pas fourni de résultats permettant leur classification, nous avons néanmoins pu remarquer qu'étant donnée la durée du signal, seule la zone où l'avalanche produit le plus d'énergie a été enregistrée.

La détermination de l'azimut fournit une information importante. Il nous faudra maintenant valider la méthode de détermination de la distance Source-Station (obtenir un coefficient C précis), et vérifier les hypothèses faites sur la détection des ondes P et S.

Pour réaliser cette vérification et pour compléter la caractérisation spectrale, il nous faut maintenant acquérir de nouveaux signaux, en utilisant de préférence le procédé de déclenchement artificiel.

Ce travail a été financé par le contrat européen "**Capital Humain et mobilité**".

BIBLIOGRAPHIE

Navarre (J.P.), Danielou (Y.), Panel (J.M.), Taillefer (A.), Lesaffre (B.), (1991) - Détection Sismique des avalanches, *Symposium International de Chamonix*, Juin 1991

Norris (R. D.), (1994) - Seismicity of Rockfalls and Avalanches at Three Cascade Range Volcanoes: Implications for Seismic Detection of Hazardous Mass Movements, *B.S.S.A.*, Vol 84, N° 6, pp. 1925-1939, December 1994.

Plesinger (A.), Hellweg (M.) and Seidl (D.), (1986) - Interactive high resolution polarization analysis of broad-band seismograms, *Journal of Geophysics*, 59, 129-139.

St Lawrence (W. F) and Williams (T. R.), (1976) - Seismic signals associated with avalanches, *Journal of Glaciology*, Vol 17, N° 77.

Analyse des caractéristiques des particules influençant le transport de la neige par le vent à partir des profils de concentration

H. Martinez^{1,2}, M. Naaim¹, M. Roussel¹

RÉSUMÉ

Par une analyse théorique basée sur les lois de la mécanique des fluides (couche limite turbulente), on montre qu'à saturation la concentration des particules suit une loi exponentielle négative en fonction de la hauteur, avec comme condition à la limite au niveau du sol la concentration de la couche de saltation. Cette loi est déterminée par la diffusion turbulente qui tend à mettre les particules en suspension, et par la vitesse de chute dont le rôle est de limiter l'extension de la couche limite de transport. La concentration dans la zone de saltation est une fonction de la vitesse de frottement limite de déclenchement du transport. La vitesse limite d'arrachement contrôle donc la masse érodée. Ces résultats ont été confirmés par des mesures expérimentales obtenues dans une soufflerie diphasique grâce à l'utilisation des techniques de visualisation laser et de traitement d'images. Une confrontation entre les résultats théoriques et la mesure est présentée.

ABSTRACT

To better understand the factors influencing the mechanics of aeolian transport of solid particles (such as snow, sand or soil) we have developed a theoretical model. This model is based on the boundary layer theory, where the particle mass conservation is considered. Assuming that the saturation is reached, the concentration profile can be represented by a negative exponential law. By means of this analysis, the influence of particle characteristics is explored through the roles of threshold friction velocity and fall velocity. Using fluid mechanics laws, an analysis of the concentration profile resulting from the effect of the wind on a particle bed was also developed. For several velocities of flow and for different kinds of particles an experimental determination of the concentration profile was achieved. We used a laser visualisation and image processing technique to carry out these experiments. The obtained results fit with the values predicted by the theoretical model.

INTRODUCTION

Le problème lié à la mise en vol des particules par le vent intéresse des domaines d'application très variés. Cela va du transport de particules en milieux industriels au transport de particules de neige ou de sable en milieux naturels. La mise en vol des particules par un écoulement turbulent a été fortement étudiée (Bagnold, 1941 ; Owen, 1965 ; White, 1965 ; Hinds, 1982). Les modèles existants, développés en appliquant les lois de la statique, mettent en jeu les différentes forces s'exerçant sur une particule : la force de gravité, la force aérodynamique exercée par l'écoulement et la force d'interaction entre particules. A la limite de l'équilibre, la somme des moments de ces forces permet de déterminer leur contrainte limite d'arrachement. La particule arrachée se trouve alors dans un écoulement qui selon sa vitesse de chute peut soit l'entraîner (suspension), soit la redéposer (saltation). Ces différents modes de transport dépendent des caractéristiques de l'écoulement et de celles des particules, à savoir : vitesse de frottement seuil et vitesse limite de chute.

¹ CEMAGREF - Division Nivologie. BP 76. F-38402 Saint Martin d'Hères.

Tél : (33) 76-76-27-16 / Fax : (33) 76-51-38-03

² CONICET - Ianigla. CC 330. 5500 Mendoza. Argentine. Tél : (54-61) 241029 / Fax : (54-61) 287370

L'ARRACHEMENT DES PARTICULES

Chaque particule est alors soumise à des forces qui engendrent une contrainte (τ_{12}) au sein du dépôt. La projection du moment résultant dans la direction de l'écoulement s'écrit :

$$\tau_{12} S d - mg d \sin(\alpha) = 0 \quad (1)$$

où S est la surface de contact entre la particule et l'écoulement, g l'accélération de la pesanteur et d et m le diamètre et la masse de la particule considérée. Une bonne approximation de l'angle de repos α est l'angle de frottement interne. L'angle de frottement choisi correspond à l'effet de toutes les forces de contact en présence dans le milieu granulaire (courte portée liée soit à l'humidité soit aux forces électrostatiques). Bagnold (Bagnold, 1941) a proposé une formulation qui détermine la contrainte totale τ_0 en fonction du diamètre des particules :

$$\tau_0 = A \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) g d \quad (2)$$

où ρ_p est la masse volumique des particules, ρ la masse volumique de l'air et A un coefficient (White, 1965). La contrainte seuil τ_t est souvent représentée comme fonction de la vitesse turbulente limite u_{*t} au delà de laquelle le transport de particule a lieu :

$$\tau_t = \rho u_{*t}^2 \quad (3)$$

Pour nos expériences, cette vitesse seuil est déterminée expérimentalement pour chaque matériau. Un lit de particules est placé dans la soufflerie et on observe au moyen d'une caméra sa surface en augmentant progressivement la vitesse de l'écoulement. Différentes formulations montrent que le flux horizontal dans la zone de saltation est proportionnel à $(u_* - u_{*t})^3$ (Bagnold, 1941). Pour le flux massique horizontal ϕ , Owen (Owen, 1964) propose la formulation suivante :

$$\phi = \left(0.25 + \frac{w_f}{3u_*} \right) \left(\frac{u_*^2 - u_s^2}{u_*^2} \right) \frac{\rho}{g} u_*^3 \quad (4)$$

Ce flux est proportionnel à la vitesse de chute w_f qui est une caractéristique très importante puisqu'elle limite la diffusion turbulente. Elle est déterminée dans le cas d'un écoulement turbulent par approximations successives, grâce aux formulations suivantes (Hinds, 1982) :

$$P_{app} = (\rho_s - \rho_a) g \left(\frac{\pi d^3}{6} \right) ; \quad T = C_d \left(\frac{\rho_a d^2}{2} \right) \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \\ \text{ou } C_d = \frac{24}{R_{w_f}} \left(1 + \frac{R_{w_f}^{2/3}}{6} \right) \quad \text{et } R_{w_f} = \frac{w_f d}{\nu} \quad (5)$$

Pour calculer la vitesse de chute d'un grain sphérique dans un fluide au repos, on considère que le poids apparent d'une particule (P_{app}) est égal à la traînée (T) correspondant à la vitesse de chute (w_f). C_d est un coefficient de traînée et R_{w_f} est le nombre de Reynolds associé à la vitesse de chute de la particule.

LA DYNAMIQUE DU TRANSPORT

La contrainte au sol appliquée par l'écoulement turbulent (τ_0) est variable dans le temps. Ceci introduit une dynamique d'arrachement dépendante de la fréquence de passage des bouffées turbulentes (excès de contrainte). On appelle bouffée la durée par laquelle la contrainte exercée par l'écoulement est supérieure à la contrainte critique (seuil) de la particule (τ_c). La particule arrachée est alors entraînée par l'écoulement et glisse par rapport au fluide (différence de densité). Après avoir quitté la bouffée qui l'a prélevée, sa vitesse de chute aura tendance à la ramener vers le sol. Si pendant sa trajectoire, la particule ne rencontre aucune autre bouffée, la dynamique du phénomène s'arrête là : c'est le phénomène de *saltation*. Dans le cas contraire, la nouvelle bouffée soulève encore plus la particule et le phénomène s'entretient jusqu'à l'obtention d'une large bande de transport. Ce phénomène de mise en suspension des particules est appelé *diffusion turbulente*. Dans un dépôt de particules de diamètre ou de densité variables (vitesse de chute et contrainte d'arrachement variables), on obtient une distribution verticale comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau 1

Suspension $\left(\frac{z}{\delta} > 0,5\right)$	<ul style="list-style-type: none"> • vitesse de chute < vitesse moyenne d'écoulement • faible diffusion turbulente
Zone intermédiaire $\left(0,05 < \frac{z}{\delta} < 0,5\right)$	<ul style="list-style-type: none"> • vitesse de chute \approx vitesse moyenne d'écoulement • forte diffusion turbulente
Saltation et reptation $\frac{z}{\delta} < 0,05$	<ul style="list-style-type: none"> • vitesse de chute > vitesse moyenne d'écoulement • trajectoire parabolique des particules

où z est la hauteur et δ est l'épaisseur de la couche limite. Par analogie avec la théorie classique de la couche limite définie en mécanique des fluides, on introduit la notion de couche limite de transport (Naaim, Martinez, 1995), zone dans laquelle s'effectue l'essentiel du transport de particules. Elle est définie par son épaisseur δ , telle que le rapport entre la concentration massique et δ soit égale à 1% de la concentration de la couche de saltation. A partir du profil théorique de concentration (Martinez, Naaim, 1993)

$$c = c_s \left(\frac{z}{z_s}\right)^{-\frac{|w_f|}{0,41 u^*}} \quad (6)$$

(avec z_s : hauteur de la zone de saltation et c_s : concentration moyenne dans la zone de saltation) l'épaisseur de la couche limite de transport est donnée par :

$$\frac{\delta_s}{z_s} = \left(\frac{c_s \delta_s}{c_s}\right)^{-\frac{0,41 u^*}{w_f}} = (0,01)^{-\frac{0,41 u^*}{w_f}} \quad (7)$$

LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Les mesures des profils de concentration sont réalisés dans notre soufflerie diphasique grâce à l'utilisation de techniques de visualisation laser et de traitement d'images. Pour des raisons de transportabilité, contraste et spectre granulométrique mono-disperse, nous avons choisi d'utiliser

des billes de P.V.C avec trois granulométries différentes. Leur caractéristiques sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau 2

billes de P.V.C.	ρ_p (kg/m ³)	diamètre moyenne (μm)	u^*_t (m/s)	w_f (m/s)
A	544	170	0,134	0,93
B	591	132	0,147	0,77
C	1410	112	0,143	1,17

Afin de recréer rapidement un profil de vitesse de type logarithmique, correspondant à un écoulement turbulent établi, il a été disposé dans la partie resserrée du convergent une grille ainsi que des générateurs de turbulence de type dents de scie d'une hauteur de 5 cm. La couche limite est ainsi passée de 10 cm à 20 cm de hauteur. Deux raisons essentielles ont orienté notre choix de particules : un spectre granulométrique étroit et un meilleur contraste pour la visualisation.

La chaîne d'acquisition est constituée de deux modules. Le premier est un dispositif optique qui permet de visualiser les particules par la création d'un plan laser. Le second module est un système de prise et de traitement d'images. Par l'intermédiaire d'une caméra C.C.D. monochrome reliée à un magnétoscope, on filme les particules éclairées dans la nappe laser. L'image enregistrée est ensuite digitalisée par l'intermédiaire d'une carte de numérisation. Pour chaque point, l'intensité lumineuse peut avoir une valeur comprise entre 0 (noir) et 255 (blanc), les points intermédiaires constituant toute la gamme de gris.

Le logiciel Wima (développé par le laboratoire Traitement du Signal et Instrumentation de l'Université de Saint-Étienne, France) permet de dépouiller les images numérisées et de déterminer les profils de concentration. Les images sont ensuite seuillée et les particules mises en évidence. Le seuillage optimum a été obtenu grâce à l'utilisation d'un dispositif formé de fil tendu sur lesquels sont fixés des particules. Le résultat du seuillage est un fichier dans lequel sont stockées les coordonnées et les surfaces des particules détectées. Pour chaque image le plan vertical (entre la position du sol, z_{\min} , et la partie haute de l'écoulement, z_{\max}) est divisé en 50 tranches horizontales de même épaisseur Δz . A partir de plus de 100 fichiers de données (obtenus dans les mêmes conditions expérimentales) on a récupéré l'aire de particules mesurée par tranche. La concentration moyenne par tranche est donnée par :

$$c_{tr} = \rho_p \frac{\sum V_p}{V_{tr}} = \rho_p \frac{(2/3) d_p \sum A_p}{(512 e_x) (\Delta z e_z) (l)} \quad (8)$$

où ρ_p représente la masse volumique du P.V.C, V_p le volume d'une particule, V_{tr} le volume de la tranche, d_p le diamètre d'une particule, A_p l'aire d'une particule, e_x l'échelle horizontale (dans le sens de l'écoulement), e_z l'échelle verticale (en hauteur) et l représente la largeur de la nappe laser.

ANALYSES DES INFLUENCES DE w_f , u^*_t et u SUR LES PROFILS DE CONCENTRATION

Le but de ce paragraphe est de confirmer par la mesure le rôle théorique joué par la vitesse de chute (w_f). Cette comparaison est ici faite entre les matériaux A et C (figure 1), A ayant une w_f plus petite que C. Pour le matériaux C les résultats montrent que l'écoulement transporte le plus gros de sa charge dans les basses couches, où la concentration est plus forte que celle obtenue pour le matériaux A. Par contre, dans le cas de ce dernier, la répartition verticale de la concentration est plus uniforme et la hauteur de la couche limite de transport est plus haute.

L'analyse théorique prévoit que la vitesse de frottement seuil (u^*) contrôle l'érosion et la concentration dans la zone de saltation. Le flux massique est proportionnel au carré de la différence entre la vitesse de frottement du fluide est celle de frottement seuil. Afin de confirmer ces résultats, les profils de concentration des matériaux A et B ont été comparés. La vitesse de frottement seuil du matériaux A est de 10% inférieure à celle du matériaux B. Même si la vitesse de chute de A est de 20% supérieure à B, le profil de concentration expérimental de B reste inférieur à celui de A (figure 2).

Pour des valeurs de vitesse d'écoulement (u) correspondant au déclenchement du phénomène de transport, l'augmentation de flux massique est très importante. Cependant, cette augmentation est moins prononcée pour des vitesses plus élevées. Ce phénomène de charge peut expliquer la diminution de la capacité d'érosion.

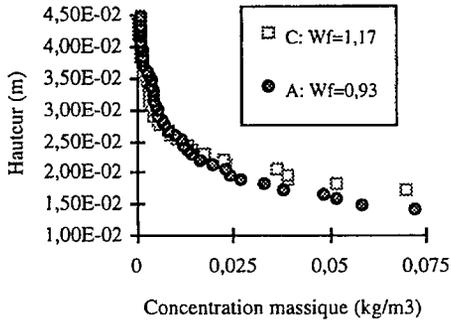


Figure 1. Influence de la vitesse de chute (w_f)

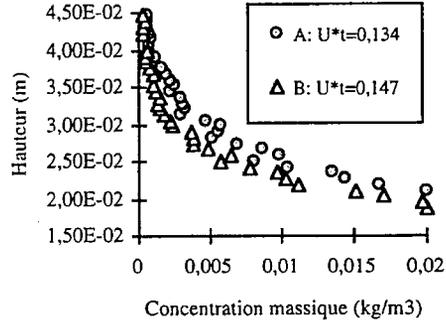


Figure 2. Influence de la vitesse de frottement seuil

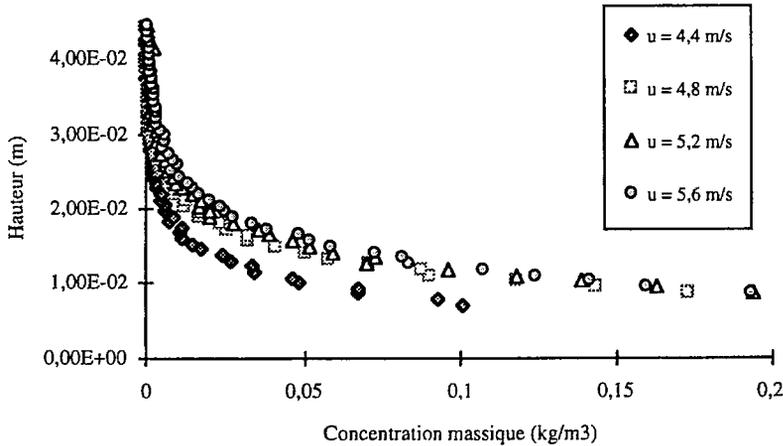


Figure 3. Influence de la vitesse d'écoulement (u)

CONCLUSION

Les deux principaux paramètres liés aux caractéristiques des particules sont d'une part la vitesse de frottement limite au delà de laquelle le transport a lieu, et d'autre part la vitesse de chute. Pour les trois différents matériaux d'étude, des profils de concentration ont été déterminés et les

mesures ont montré qu'ils suivent bien les profils prévus par le modèle théorique. Le rôle de la vitesse de chute sur l'extension de la couche limite de transport a été mis en évidence et le rôle de la vitesse de frottement seuil qui contrôle le phénomène d'érosion a été confirmé par les résultats obtenus. Ces résultats expérimentaux montrent que la vitesse de chute a un rôle déterminant dans la dynamique du transport. En effet, c'est la vitesse de chute qui limite le rôle de la diffusion turbulente verticale. Lorsque la vitesse de chute est forte, l'extension de la couche limite de transport est réduite et l'essentiel de la masse transportée se fait près de la zone de saltation. Par contre, quand la vitesse de chute est faible, la couche limite de transport est plus épaisse et induit un transport de particules sur une plus grande hauteur. De plus, si le rôle de la vitesse de chute est de contrôler le profil de concentration, le rôle de la vitesse seuil d'arrachement est de contrôler la masse arrachée. Ainsi, pour un même écoulement, quand u_*^t est élevée, la masse arrachée est faible et la concentration dans la zone de saltation est réduite. Par contre quand u_*^t est faible, la masse arrachée est forte et la concentration dans la zone de saltation est importante. Enfin, la vitesse de l'écoulement contrôle le mécanisme d'arrachement des particules et la capacité d'érosion dépend fortement de la charge de l'écoulement.

Cette technique a donné des résultats très encourageants dans le cas d'un écoulement chargé avec obstacles (en présence de barrières). La connaissance des profils de concentration en particules dans un écoulement diphasique peut se révéler indispensable tant dans le domaine de la recherche fondamentale que dans celui de la recherche appliquée. Citons à titre d'exemple quelques résultats obtenus dans notre laboratoire, utilisant la méthode précédemment décrite :

- étude de l'influence des profils de concentrations sur les critères de similitude pour la modélisation physique du transport de particules

- analyse des profils de concentrations derrière des écrans en vue de minimiser les problèmes de visibilité des automobilistes pendant un épisode de transport de particules (transport de neige par le vent ou vent de sable).

Le but à présent est de déterminer la dynamique du transport dans la zone non saturée, en introduisant la notion de flux vertical d'arrachement de particules. Les mesures réalisées par Takeuchi (Takeuchi, 1980) montrent que l'écoulement doit parcourir une certaine distance avant d'atteindre sa concentration de saturation. L'augmentation de la concentration en particules est ainsi fonction du temps : le fluide se charge progressivement en particules jusqu'à la concentration de saturation et la capacité d'arrachement (Castelle, 1995, p. 105) diminue en fonction de la distance parcourue.

RÉFÉRENCES

- Bagnold (R.), 1941 - The physics of blown sand and desert dunes, London, *Chapman & Hall Editions*, 265 p.
- Castelle (T.), 1995 - Transport de la Neige par le Vent en Montagne : Approche Expérimentale du Site du Col du Lac Blanc, Thèse N° 1303 de l'EPFL, Lausanne, 255p.
- Hinds (W.), 1982 - Aerosol Technology : Properties, Behaviour, and Measurement of airborne particles, *John Wiley & Sons*, 424 p.
- Martinez (H.) et Naaim (M.), 1993 - Détermination expérimentale et numérique du profil vertical de concentration dans un écoulement chargé, *Actes du 11^e Congrès Français de Mécanique*, Lille, Vol. 2, pp. 289-292
- Naaim (M.) et Martinez (H.), 1995 - Experimental and Theoretical Determination of Concentration Profiles and Influence of Particle Characteristics in Blowing Snow, *Surveys in Geophysics* (à paraître)
- Owen (P.), 1964 - Saltation of Uniform Grains in Air, *J. Fluid Mech.*, 39, pp. 407-432
- Takeuchi (M.), 1980 - Vertical Profile and Horizontal Increase of Drift Snow Transport, *Journal of Glaciology*, Vol. 26, N°94, pp. 481-492
- White (B.), 1965 - Particle Dynamics in Two-Phase Flows, *Encyclopedia of Fluid Dynamics*, Houston Texas, Gulf Publishing Co., Chap. 8, pp. 237-282

Numerical model of powder snow avalanche

Theoretical analysis and application

Modèle numérique d'avalanches poudreuses. Théorie et application

M. Naaim¹

ABSTRACT

In this paper the powder snow avalanche is considered as a gravity current. The equations governing this flow are the fluids mechanics conservation laws. The flow of the powder avalanche is characterized by a high turbulence that obliges to use a closure model. The flow area is then digitated horizontally and vertically using a finite elements mesh. The numerical scheme is obtained by the integration of the equations on each cell. The model thus builds is validated using laboratory measures in the case of density current realized in flume. At the end of this paper, an application of this model in the case of an engeneering study, is presented.

RESUME

L'avalanche de neige poudreuse est considérée comme l'écoulement d'un fluide lourd, (particules + air) dans un fluide léger (air) sous l'effet de la gravité. Les équations régissant cet écoulement sont les lois de conservation de la mécanique des fluides. L'écoulement des avalanches aérosols est caractérisé par une forte turbulence qui nécessite l'utilisation d'un modèle de fermeture. Le domaine d'écoulement est ensuite maillé horizontalement et verticalement grâce à l'utilisation d'un maillage type éléments finis. Les équations écrites sous leur forme conservative sont intégrées sur chaque maille. Le modèle ainsi construit est validé par des mesures de bouffées de densité (mélange d'eau et de particules solides) réalisées en canal noyé. A la fin de cet article, un exemple d'application de cette modélisation dans le cas d'un zonage, est présenté.

1- INTRODUCTION

Aerosol avalanche can be considered as diphasic flows of heavy fluid formed by air and snow particles in suspension in air. The difference of density between these fluids produce the flow thanks to the effect of the gravity. The flow is therefore studied as a gravity current. The proposed modelling assumes that the air is a Newtonian perfect gas, and that particles in suspension do not modify the behaviour of the fluid neither the turbulence of the flow. The equations are written in a galilean axis system formed by three axes; the x-axis and the y-axis form the horizontal plan and the z-axis is the vertical. In this axis system, the gravity vector is given by $\vec{g} = (0, 0, -g)^t$. The other variables are: ρ_g the density of the air, ρ_s density of the snow, $\vec{u} = (u, v, w)^t$ the velocity vector, p the pressure, c the volumic concentration in particles and $\rho_m = \rho_g + c\rho_s$ the average density

2- BASIC EQUATIONS :

Equations governing the flow are the conservation laws of fluid mechanics. They are the conservation of the air mass , the conservation of the particles mass and the conservation of

¹ Division Nivologie / Cemagref
BP 76 38402 Saint Martin d'Hères - France
Email : mohamed.naaim@cemagref.fr, tel :33- 76762722 and fax : 33-76513803

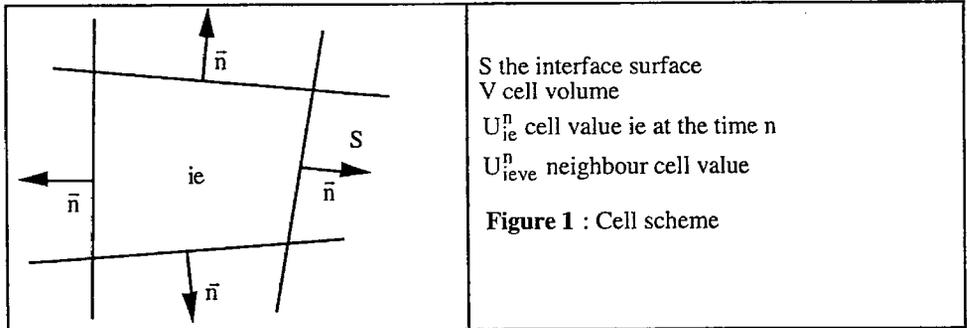
the momentum. The introduction of the Reynolds decomposition followed by a statistical processing enables to obtain the average equations of the mean movement. In these equations a new variables appear. It correspond to the second order correlations resulting from the nonlinearity of the Navier Stokes equations. We obtain them using the Boussinesq law (called also law of eddy viscosity), belonging to the class of models using the turbulent viscosity concept. Equations of the movement are written as follow :

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ c \\ k \end{bmatrix} + \text{div} \begin{bmatrix} \rho u & \rho v & \rho w \\ \rho u^2 + p & \rho uv & \rho uw \\ \rho uv & \rho v^2 + p & \rho vw \\ \rho uw & \rho vw & \rho w^2 + p \\ cu & cv & cw \\ ku & kv & kw \end{bmatrix} = \text{div} \left(v_t \vec{\nabla} \begin{bmatrix} 0 \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ c \\ k \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\rho g \\ 0 \\ P_r - \epsilon \end{bmatrix}$$

where $p = k\rho_g^Y$, w_g is the particle fall-velocity and the turbulent viscosity is linked to the kinetic turbulent energy k by the following formula : $v_t = C_1 L k^{1/2}$ where $C_1 = 0,43$ and the turbulent energy production is given by $P_r = \left[v_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right] \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$.

3 - NUMERICAL RESOLUTION

The calculation area is decomposed on a parallelepiped cells of variable dimensions (finite elements mesh). Information concerning each cell are :



The equations system can be written under the following vectorial form :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div}[F(U)] = \text{div} \left[v_t \vec{\nabla} H(U) \right] + G(U)$$

The equations system is put in the conservative form in view of its numerical resolution. The scheme is realised in finite volumes, what allows a well-off adaptation to an area of variable form (relief of an avalanche corridor). The scheme is a second order in space and first order in time accuracy. The system is then integrated on each cell between two consecutive times. The scheme is obtained in two steps : the projection step and the integration step. To each time, the step of projection consists in allocating to each cell the average value of the vector

U, obtained by integrating U on the cell volume : $U_{ie}^n = \frac{1}{V} \int_V U dv$ and the integration step consists in integrating the system on each cell between times t (n) and t (n + 1) :

$$V (U_{ie}^{n+1} - U_{ie}^n) + \int_{t(n)}^{t(n+1)} \int_S [\text{div } F(U) - \text{div} (v_t \bar{\nabla}(U)) - G(U)] dv dt = 0$$

The Ostrogradsky theorem allows to transform the volumic integral in surfacic integral. It is then transformed into sum on facets :

$$U_{ie}^{n+1} = U_{ie}^n - \frac{\Delta t}{V} \int_{\Gamma} [F(U^n) \bar{n} - v_t \bar{\nabla}(U^n) \bar{n}] dS + \Delta t G(U_{ie}^n)$$

$$U_{ie}^{n+1} = U_{ie}^n - \frac{\Delta t}{V} \sum_{ij=1}^4 [F(U_{ij}^n) \bar{n}_{ij}] S_{ia} + \frac{\Delta t}{V} \sum_{ia=1}^4 [v_t \bar{\nabla}(U_{ij}^n) \bar{n}_{ij}] S_{ij} + \Delta t G(U_{ie}^n)$$

Using the average neighbour values of cell, we build the gradient of U in order to obtain a parabolic approximation. The three components of the local gradient vector are obtained by the minimisation of the following function :

$$\psi = \sum_{ieve \in K(ie)} \left[U_{ieve}^n - \left(U_{ie}^n + \frac{\partial U}{\partial x} (x_{ieve} - x_c) + \frac{\partial U}{\partial y} (y_{ieve} - y_c) + \frac{\partial U}{\partial z} (z_{ieve} - z_c) \right) \right]^2$$

where (K (ie)) is the totality of ie cell neighbours . In the calculation of diffusion terms the used value of the gradient is obtained by the minimisation step. On the other hand for the resolution of the hyperbolic part of the system, in order to preserve the stability of the scheme, it is necessary to limit the value gradient of U on each element so as to not to create new local extremums. To obtain the contribution of the hyperbolic part of the system to the term of the flux we proceed the next manner :

- thanks to the property of invariance by rotation of the equations system , we write the system in the local axis system formed by the tangent plan and the normal to the facet. In order to reduce the calculation of the flux to a one dimensional case we suppose that the variation in the tangent direction is negligible.

- The problem becoming monodimensional, we can then use a solver of the Riemann problem posed on each interface :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x_n} = 0, U(x, 0) = \begin{cases} U_g & \text{si } x_n < 0 \\ U_d & \text{si } x_n > 0 \end{cases} / \begin{cases} U_g = U_{ieg} + (\bar{\nabla} U)_{ieg} \cdot (\bar{x}_{interface} - \bar{x}_{ieg}) \\ U_d = U_{ied} + (\bar{\nabla} U)_{ied} \cdot (\bar{x}_{interface} - \bar{x}_{ied}) \end{cases}$$

where ieg is the left cell and ied is the right cell of the facet. The resolution of the Riemann problem allows to determine the numerical flux through the interface. It is important to signal here the limitation of the of time step introduced by the utilisation of this explicit scheme.

4- MODELLING VALIDATION

In this part the aim is to verify the validity of the model comparing its results to those obtained in the case of density gravity currents experiences realised in (2d) water flume. In these experiences we study the flow produced by a finite volume of heavy fluid content in a reservoir that we open quasi instantaneous in the flume containing the ambient fluid. The slope of the flume, the heavy fluid volume and its density are variable. To measure the flow parameters, the dense fluid is generally coloured. The position of the front and the dimensions

of the gravity current (length and height) are determined. Several tests have been used to test the validity of the numerical model. We have used experimental measures obtained by Pierre Beghin in the case of bidimensional density currents.

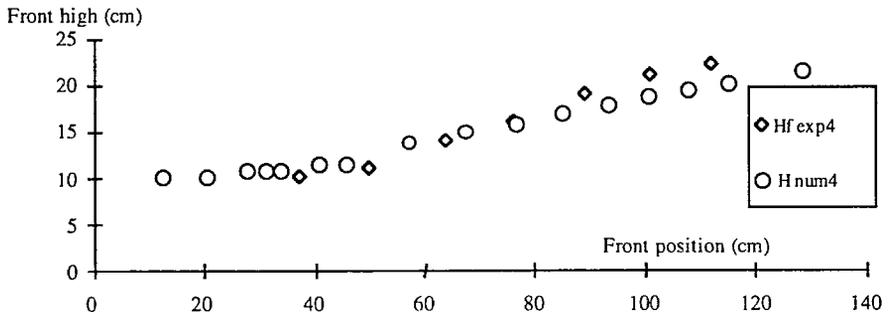


Figure 2 : Example : front high function of front position

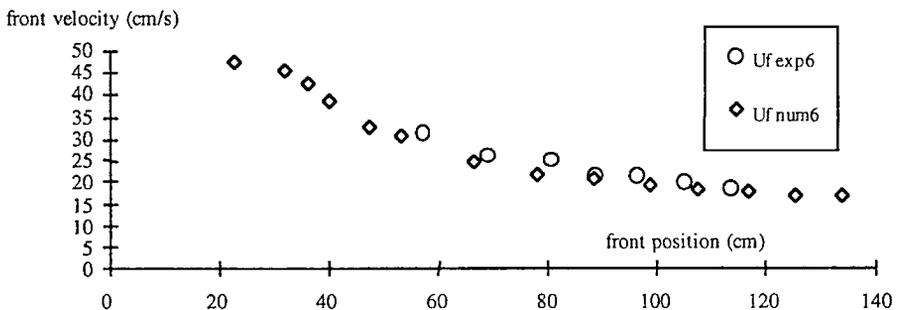


Figure 3 : Example : front velocity function of front position

For the established phase as well as for the phase of deceleration, the measures show that the results of the model are globally close enough to the experimental results. For the phase of acceleration, the dynamics is especially shown by numerical simulations. Indeed we have no experimental measures in this phase. The qualitative study of numerical results shows that the model correctly predicts height and velocity evolution of the front of the bidimensional gravity current. The numerical model reproduces different characteristics of the gravity currents : centre of vorticity, drag air etc. . Quantitative comparisons are more difficult to do because the experimental results are the result of a unique experience. However we can conclude that the proposed model describes globally the different phases of the flow. Indeed, for the height of the front and its speed the results given by the numerical model are close to the experiences results.

5. APPLICATION EXAMPLE

5.1 The framework of the study

The purpose of this part is to show on an practice example that the proposed modelling can bring an assistance to engineers to design a map of the zones threatened by avalanches. It is used here to find an equivalent to the powder avalanche occurred on the Bourgeat (Haute Savoie-France) at the December 26th 93. Using the available data, and the numerical model, the purpose is to determine an equivalent avalanche in terms of damages, to this aerosol. The maximal pressure field will then be mapped for this avalanche and for an avalanche that

would contain 30% more snow in order to evaluate the influence of this increase on the extension of the avalanche.

5.2. Description of the available data

The used results are extracted from an inquiry of the association of the residents and from the survey made both by R.T.M. services, the Police, and by the Nivologie division so as to at best specify magnitude of the aerosol avalanche of December 26th 1993. These results are :

- photographs taken during the flow by different persons. From these photographs, it is possible to approximately assess the thickness of the flow at several places;
- a map of the zone by the avalanche realised by Gilles Borrel (Cemagref) on the French probable location map of avalanches (scale 1/25000).

- And finally, an inquiry concerning damages caused by this avalanche whose result is a map of the zone having undergone significant damages. This limit has been assessed as being the zone having undergone a constraint approximately superior to 100 daN/m².

5.3 Numerical simulation and determination of the reference avalanche

In the Bourgeat avalanche path, the study zone is limited uphill to the altitude 1500 m and downhill to national road that crosses the valley. From a topographic map (scale = 1/10000) we build a digital terrain model. We will consider that an avalanche is equivalent to the avalanche of the December 26th, 1993 if the limits of the exerted stress are the same as those determined by the survey. A research of this avalanche has been made of the following manner :

- after a thorough analysis of the different available documents, the values at the entrance of the study zone have been estimated at : the width to 200m, the height to 70m, the length to 400m and the speed to 50m/s.

- if the definition of these values is feasible thanks to terrain data, the estimation of the volume of snow dragged in by the aerosol is a lot less easy to realise. We have made this factor vary to find the equivalent avalanche. We have realised different simulations by increasing the mass of the snow.

The mass of snow of the equivalent avalanche is $2.5 \cdot 10^6$ kg. The zone of influence of this avalanche corresponds almost everywhere to the result of the inquiry of terrain. It presents nevertheless on edges an excess of a hundred of meters on either side of this zone. It is necessary to notice that in these zones data allowing to determine the developed pressure (trees, habitations) are both less frequent and less reliable.

5.4 Simulation of the reference avalanche with 30% increased mass

After the determination of the equivalent avalanche, we can solve the second problem. The aim is to estimate the influence of an increase of 30% of the mass of the avalanche on the extension of the damages zone. That has been made, by increasing the avalanche mass and by keeping the other variables constant. Results are traced for these cases on the figure 3.

6. CONCLUSION

We have shown in this paper the different steps of the development of a numerical model. We have reminded succinctly principles and physical laws used. We have exposed the different numerical resolution steps and the phase of validation using laboratory measures. Finally we have presented an application case in which the models have allowed to determine the extensions of a powder avalanche. This type of model, when it is used by a trained experts, can allow to construct a plausible image of an avalanche by determining both macroscopic and microscopic values which are : the height, the front velocity, the local speeds, the pressures and the turbulence.

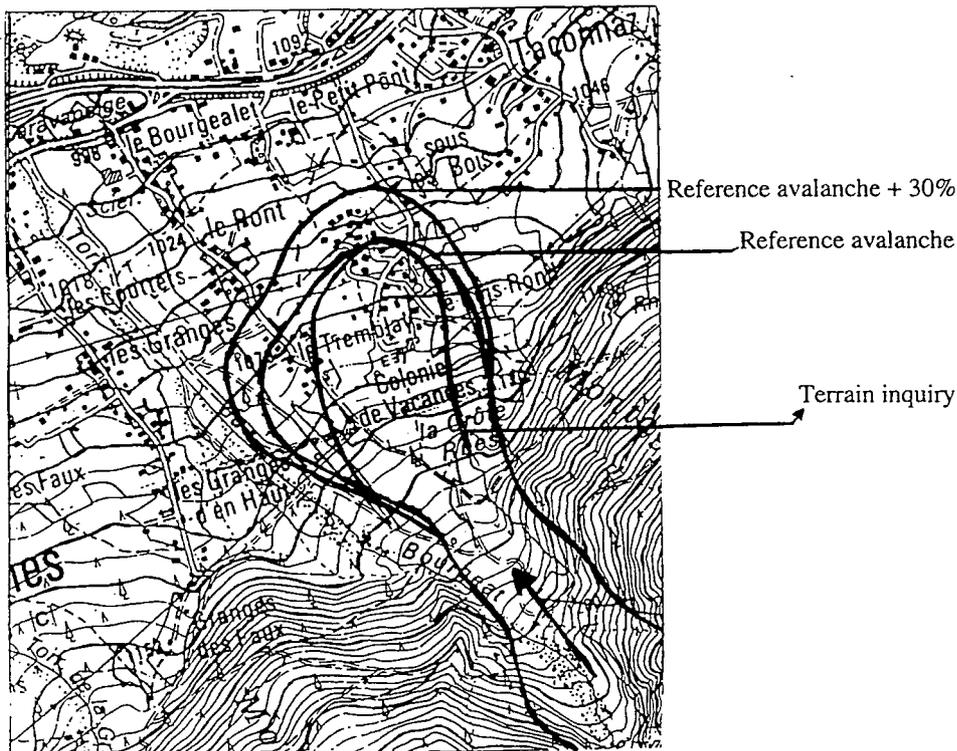


Figure 4 : Different avalanches limits

BIBLIOGRAPHY

- BEGHIN (P.), OLAGNE (X.), 1991, - Experimental and theoretical study of the dynamics of powder snow avalanches - *Cold Regions Science and Technology*, 1991, vol.19.
- BEGHIN (P.), 1979 - *Etude des bouffées bidimensionnelles de densité en écoulement sur pente avec application aux avalanches de neige poudreuse* - Grenoble : Université Joseph Fourier, (Thèse de doctorat).
- HOPFINGER (E. J.), TOCHON-DANGUY (J. C.) - 1977, A model study of powder snow avalanche - *Journal of Glaciology*, vol.19, p.343-356.
- NAAIM (M.), Brugnot (G.), 1994 - Free surface flow modelling on a complex topography, *Proceedings of the specialty conference : Modelling of flood propagation over initially dry areas*, Asce, Milan, Juin 94
- Naaim (M.), (1995), « Modélisation numérique des avalanches aérosols », Colloque d'Hydrotechnique, 151 Session du CST, *Publications de la SHF*, ISBN 2.906831.26.3
- NAAIM (M.), MARTINEZ (H.), 1995, "Experimental and theoretical determination of concentration profiles and influence of particle characteristics in blowing snow", *Surveys in Geophysics.*, à paraître

L'accord du Conseil de l'Europe « Eur-Opa risques majeurs »

F. Tondre¹

RESUME

L'Accord Partiel Ouvert du Conseil de l'Europe en matière de prévention, de protection et d'organisation des secours contre les risques naturels et technologiques majeurs, établi en mars 1987, a pour objectif de resserrer d'un point de vue pluridisciplinaire la coopération dans le domaine de la gestion des risques entre ses Etats membres. Cet Accord compte actuellement 23 Etats membres. La Commission des Communautés Européennes, l'Organisation Mondiale de la Santé, l'UNESCO, le Département des Affaires Humanitaires des Nations Unies y participent. Le Japon a un statut d'observateur.

Dans le cadre de cet Accord, la Résolution 2 sur l'utilisation des technologies spatiales au service de la gestion des risques a été adoptée le 6 octobre 1994 par les Ministres de l'Accord. Cette Résolution demande la poursuite de l'étude prospective à présent engagée sur l'utilisation des technologies spatiales tant en ce qui concerne la surveillance, la navigation, les télécommunications, que la collecte et la transmission des données. Elle demande également la mise en oeuvre d'une série de projets de démonstration significatifs utilisant les moyens spatiaux en complément des autres techniques dans les domaines des risques naturels et technologiques.

Sur le plan européen, des programmes bilatéraux et multilatéraux ont été mis en oeuvre sur le thème des risques en montagne. La question à étudier au cours de ce symposium est "Les technologies spatiales peuvent-elles apporter une contribution significative à la gestion des risques en montagne?"

ABSTRACT

The Council of Europe's Open Partial Agreement on the prevention of, protection against and organisation of relief in major natural and technological disasters, established in March 1987, strengthens cooperation from a multidisciplinary point of view in the field of risk management between its member States. This Agreement counts 23 member States to date. The Commission of the European Communities, the World Health Organisation, UNESCO, the United Nations Department for Humanitarian Affairs participate in its work. Japan has observer status.

Within this Agreement, Resolution 2 on the use of space technologies to assist risk management was adopted by the Ministers of the Agreement on 6 October 1994. This Resolution requests the continuation of the prospective study currently underway concerning monitoring, navigation, telecommunications, as well as data collection and transmission. It also requests the implementation of a series of significant demonstration projects using space equipment supplementary to other techniques in the areas of natural and technological disasters.

Bilateral and multilateral programmes have been set up at European level on the theme of risks in mountain areas. The question under consideration at this symposium is "Can space technologies contribute significantly to risk management in mountain areas?"

¹

Conseil de l'Europe
Secrétariat Exécutif de l'Accord Eur-Opa Risques Majeurs
F-67075 Strasbourg-Cedex
Tel: 33/88 41 26 16, Fax: 33/88 41 27 87

En mars 1987, le Comité des Ministres du Conseil de l'Europe a adopté un Accord intergouvernemental partiel ouvert dont l'objectif principal est de resserrer la coopération entre les Etats membres d'un point de vue pluridisciplinaire afin d'assurer une meilleure prévention, protection et organisation des secours en cas de catastrophes naturelles et technologiques majeures.

Cet Accord Partiel Ouvert appelé "Accord EUR-OPA Risques Majeurs" compte actuellement 23 Etats membres : Albanie, Algérie, Arménie, Azerbaïdjan, Bélarus, Belgique, Bulgarie, Espagne, France, Géorgie, Grèce, Israël, Italie, Lettonie, Luxembourg, Malte, Maroc, Monaco, Portugal, Saint-Marin, Russie, Turquie, Ukraine. Le Japon a le statut d'observateur auprès de cet Accord.

La Commission Européenne, l'UNESCO, l'OMS, et le Département des Affaires Humanitaires des Nations Unies y participent. La Fédération Internationale des Sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge est associée à ses travaux.

L'Accord a pour objectif principal de dynamiser la coopération entre les Etats membres en faisant appel à toutes les ressources et connaissances actuelles pour assurer une gestion efficace et solidaire des risques majeurs. Il est dit "ouvert" car tout Etat non membre du Conseil de l'Europe peut demander à y adhérer. Ainsi, comme indiqué dans la "Charte de Moscou", adoptée par les Ministres de l'Accord le 2 octobre 1993 à Moscou, l'Accord représente : "Une plate-forme de coopération entre l'Europe de l'Est, le Sud de la Méditerranée et l'Europe de l'Ouest dans le domaine des risques naturels et technologiques majeurs".

On peut distinguer trois niveaux d'actions :

1. le niveau politique à partir des réunions ministérielles et à partir du Comité des Correspondants Permanents qui déterminent la politique de coopération pour répondre aux objectifs;
2. le niveau scientifique et technique, avec :
 - . Le "Système d'Alerte Européen"
 - . Le "Comité Européen Consultatif d'Evaluation des Prévisions des Tremblements de Terre"
 - . Le Réseau des "Centres Européens Spécialisés";²

² - Institut Supérieur de planification d'urgence, Florival, Belgique
- Centre Européen sur les risques sismiques et géomorphologiques, Strasbourg France
- Centre Européen de la dynamique côtière insulaire, La Valette, Malte
- Centre Européen de dynamique non-linéaire et de théorie des risques sismiques, Moscou, Russie
- Centre Européen de formation sur les catastrophes naturelles, Ankara, Turquie
- Centre Européen pour la médecine des catastrophes, Saint-Marin
- Centre Universitaire Européen pour le patrimoine culturel, Ravello, Italie
- Centre Européen de géodynamique et de sismologie, Walferdange, Luxembourg
- Observatoire Océanologique Européen, Monaco
- Centre Européen de recherche des techniques d'information du public en situation d'urgence, Madrid, Espagne
- Centre Européen pour la prévention et la prévision des tremblements de terre, Athènes, Grèce

Un des points forts de cet Accord est d'avoir cherché à assurer un intéressement et une participation directe des Etats membres, en favorisant la création de Centres Européens. Ces structures facilitent une contribution concrète aux objectifs communs des différents partenaires à partir de la mise en oeuvre de programmes européens d'information, de formation et de recherche;

3. des programmes spécifiques qui ont la particularité par rapport aux activités des deux premiers niveaux de pouvoir faire appel à des contributions financières volontaires. A titre d'exemple, on peut citer le Programme Européen sur la Formation aux Sciences du risque: le Programme FORM-OSE (Formation Ouest européen, Sud de la Méditerranée, Est européen).

Lors de la 6ème réunion ministérielle de l'Accord tenue à Bruxelles le 6 octobre 1994, les Ministres ont adopté la Résolution No. 2 sur l'utilisation des technologies spatiales au service de la gestion des risques. En tenant compte des programmes existants ou prévus utilisant les moyens spatiaux au service de la gestion des risques dans le cadre de l'Union Européenne, de l'Agence Spatiale Européenne, des Nations Unies et des programmes nationaux, la Résolution demandait :

- a). La poursuite de l'étude prospective engagée sur l'utilisation des technologies spatiales au service des risques tant en ce qui concerne la surveillance, la navigation, les télécommunications que la collecte et la transmission des données,
- b). La mise en oeuvre d'une série de projets de démonstration significatifs utilisant les moyens spatiaux en complément des autres techniques dans le domaine des risques naturels et technologiques.

Les implications budgétaires supplémentaires de ces activités étant prises hors du Fonds spécial européen.

ETUDE PROSPECTIVE

L'Agence Spatiale Européenne a accepté de mettre en oeuvre cette étude prospective en coopération avec la Commission des Communautés Européennes. L'étude se déroule suivant quatre phases:

Phase 1 :

Identification des besoins en information au service de l'aide à la décision pour les responsables de la gestion des risques,

Phase 2 :

Inventaire des moyens spatiaux existants ou prévus en Europe de l'Est, de l'Ouest et sur le plan international pouvant contribuer à l'aide à la décision pour la gestion des risques,

Phase 3 :

Sur la base de l'hypothèse de l'utilisation optimale des moyens spatiaux existants et de la mise en évidence de la nécessité de segments spatiaux complémentaires indispensables, définition d'un outil spatial "Est-Ouest" pouvant permettre de répondre aux besoins des utilisateurs,

Phase 4 :

Analyse coût-bénéfice. Un Comité de pilotage a été mis en place pour gérer les travaux de l'étude prospective, co-présidé par l'Agence Spatiale Européenne et la Commission des Communautés Européennes.

Programmation des Phases sur le plan du calendrier:

- Phase 1 de novembre 1994 à début juillet 1995,
- Phase 2 de novembre 1994 à début juin 1995,

- Phase 3 de fin juin 1995 à fin mars 1996,
- Phase 4 de fin novembre 1995 à fin mars 1996.

Les résultats de l'étude prospective conduite par l'Agence Spatiale Européenne en collaboration avec la Commission des Communautés Européennes devraient être présentés à l'occasion de la prochaine session ministérielle de l'Accord EUR-OPA Risques Majeurs en avril 1996.

En parallèle à l'étude prospective et sur la base des résultats de programmes déjà entrepris ou d'actions mises en oeuvre et limitées dans le temps et l'espace, un certain nombre d'opérations de démonstration sont conduits dont l'objectif est d'illustrer l'apport des technologies spatiales au service de la gestion des risques. Les opérations de démonstration suivantes devraient être mises en oeuvre dans le domaine des risques naturels et technologiques:

RISQUES NATURELS

1. Inondations

L'objectif de ce projet est d'examiner les méthodologies communes pouvant être utilisées, avec l'aide des moyens spatiaux pour la gestion de deux types de crues: les crues subites et les crues de plaines. Cette opération de démonstration sera réalisée dans le cadre d'une coopération entre la Russie et la France, il comportera quatre phases:

1. Mise à jour de la cartographie des zones à risques: responsabilité de la France avec le support de la Russie (site test: Sud Est de la France).
2. Contribution au dispositif d'alerte par transmission satellite de données acquises par des plates-formes hydrologiques.
3. Pendant la durée de la crue:
 - détermination des zones inondées au moyen du traitement d'images satellitaires acquises par l'ensemble des satellites disponibles sur la zone inondée (Ressurs O et F, Meteor, Satellite dual russe, SPOT, ERS 1 et 2, NOAA, système de collecte Argos et Météosat),
 - transmission de données critiques par satellite depuis la zone inondée au centre de contrôle. Responsable France.
 - détermination par la Russie de un ou deux sites à l'occasion des crues potentielles de printemps.
4. Analyse post-crise, évaluation des conséquences.

Le rapport final sera présenté avant le 10 mars 1996.

2. Tremblements de terre

L'objectif de cette opération de démonstration est de démontrer comment l'utilisation des "systèmes d'information géographique" (S.I.G.) et des données obtenues à l'aide des moyens spatiaux peuvent faciliter la gestion du risque sismique. Dans la pratique, l'opération de démonstration cherchera à montrer l'intérêt des SIG dans la gestion des données pertinentes pour le risque sismique, l'importance de la contribution des données de télédétection et de GPS en complément des données terrain existant, le rôle fondamental des systèmes de télécommunication par satellites. Différents systèmes d'information géographique de Russie et de l'Europe de

l'Ouest devraient être utilisés et plusieurs régions tests seront prises en compte (Nord Caucase et Europe de l'Ouest).

Partenaires principaux venant de:

- . Russie,
- . France (SPOT Image, IGN Espace, BRGM Marseille, SCOT Conseil, CESG Strasbourg)
- . Grèce (Earthquake Planning and Protection Organisation Athens, National Kapodistrian University Athens)
- . Italie (Istituto de Ricercha sul Rischio Sismica di Milano)
- . Agence Spatiale Européenne,
- . CERCO: Comité européen des responsables de la cartographie officielle

Ce projet de démonstration fait l'objet d'une demande de soutien budgétaire dans le cadre des programmes TACIS-BISTRO de l'Union Européenne.

RISQUES TECHNOLOGIQUES

Transport de matières dangereuses

Deux projets de démonstration sont prévus:

1. Projet de démonstration "UKRAINE". Ce projet mis en oeuvre dans le cadre d'une coopération entre la Belgique, l'Ukraine et l'Agence Spatiale Européenne vise l'utilisation du système PRODAT pour la surveillance à l'aide de moyens spatiaux, de 7 véhicules transportant des produits toxiques (2 camions et une voiture de reconnaissance transportant des déchets radio actifs de Tchernobyl, 2 camions transportant du chlore liquide et 2 camions transportant de l'ammoniaque).

Parmi les organismes chargés de la mise en oeuvre de ce projet figurent: l'Agence Spatiale Européenne, Segment Spatal: Marecs A, SAIT Systems de Belgique chargé de la maîtrise d'oeuvre et opérateur de communication PRODAT, l'Institut des Hautes Technologies d'Ukraine et FIAR-Itali chargée des terminaux PRODAT.

Le calendrier de ce projet prévoit sa mise en oeuvre entre mars 1995 et juin 1995 et la rédaction du rapport d'expérience en juillet 1995.

2. Projet franco-russe: ce projet prévoit le contrôle de cargaisons dangereuses à l'aide de systèmes spatiaux russes et français: ARGOS, COSPASSARSAT, KURS, METEOSAT, GONETS, COSPAS-LOUTCH. Ce projet prévoit l'implantation des terminaux respectifs sur des moyens ferroviaires russes et français. Les partenaires de base sont la RKA russe et le CNES en France.

Surveillance de centrales nucléaires:

Faisant suite à la proposition présentée par le Ministère de l'environnement de Russie en coopération avec des partenaires allemands (Projet IRIS/Russie), une première opération a été réalisée concernant la centrale nucléaire de Smolensk et un rapport préliminaire a été transmis au Secrétariat Exécutif.

Télémédecine et situations d'urgence.

Un projet est actuellement préparé visant l'utilisation des moyens spatiaux de télécommunications pour réaliser des diagnostics concertés entre des médecins russes et français concernant des enfants pouvant être atteints par des cancers de la thyroïde suite à l'accident de Tchernobyl. Les demandes budgétaires relatives à ce projet de démonstration sont actuellement en cours.

Le Symposium International de Chamonix sur "Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche" me paraît une excellente opportunité pour vous poser la question: "Les technologies spatiales peuvent-elles apporter une contribution significative à la gestion du risque en montagne et en particulier en ce qui concerne les domaines sur lesquels vous vous penchez au cours de la Conférence, principalement liés à la mitigation des risques d'avalanche, des risques nivo-météorologiques et des risques géomorphologiques?"

Des nombreuses communications portent en effet sur la prévision des avalanches dont certaines considèrent l'apport de l'imagerie spatiale, de l'utilisation des techniques infra-rouges et des paramètres optiques de la neige en général.

Sur le plan européen des programmes bilatéraux et multilatéraux ont été mis en oeuvre sur ce thème. Je citerai les études sur l'utilisation des capteurs radar pour mesurer les paramètres critiques des avalanches de neige en Suisse à Davos, par le Dr. Mätzler de l'Université de Berne. De même la coopération franco-turque sur la cartographie des avalanches utilise l'imagerie spatiale SPOT.

L'Union Européenne a engagé une série de programmes sur les facteurs climatiques et le risque naturel dans le système alpin:

- le programme RIVET (recherche intégrée sur la dégradation des versants dans les territoires montagneux)
- prévision et occurrence des glissements de terrain dans la Communauté Européenne
- programme FUTURALP sur la sensibilité des éco-systèmes alpins aux changements potentiels de climats
- programme EUROSLOPE sur l'érosion et les transports de matériaux solides dans les zones abruptes.

Il serait intéressant qu'à l'occasion de cette rencontre de Chamonix, vous puissiez m'indiquer de votre point de vue si nous devrions tenir compte dans l'étude prospective que nous allons présenter à la prochaine session ministérielle de l'Accord en avril 1996, de l'apport des technologies spatiales au service de la gestion du risque en montagne.

Test of the snow cover numerical model CROCUS under a transitional snow climate with regards to operational avalanche forecasting

*Validation du modèle d'évolution du manteau neigeux
CROCUS en prévision opérationnelle du risque
d'avalanche sous un climat de transition*

L. Mingo¹

RÉSUMÉ

Un modèle numérique de simulation du manteau neigeux a été testé afin d'estimer son potentiel pour la prévision opérationnelle des risques d'avalanches. Le site expérimental est caractérisé par d'épais manteaux neigeux ainsi que par des gradients de températures généralement modérés. Une attention particulière fut portée sur les paramètres critiques qui sont observés lors de la détermination de la stabilité du manteau neigeux ainsi que pour la prévision des risques d'avalanches. Les résultats montrent que Crocus obtient de très bons résultats en simulant l'épaisseur du manteau ainsi que pour les profils de densités et de températures. Cependant, il apparaît qu'une simulation précise du métamorphisme des grains demeure une tâche très délicate, particulièrement avec des gradients de l'ordre de -5deg/m. Pour des gradients dont la magnitude est plus importante, la simulation apparaît améliorée. L'usage des échanges de chaleur de surface simulés par Crocus sont utilisés dans le but de retracer l'apparition de givre de surface et montre des résultats prometteurs.

ABSTRACT

A snow cover numerical model has been tested with respect to operational avalanche forecasting. The site of the experiments is characterized by deep snow-packs with usually moderate temperature gradients. Particular attention was given to parameters which are critical in stability assessment. Crocus proved itself being very efficient in modeling snow depth, density and temperature profiles. Results for the grain simulation show that satisfactory accuracy is difficult to achieve in the case of moderate gradients with an order of magnitude of -5deg/m. Improved grain simulation is obtained for gradients with greater magnitudes. Promising results are shown when using heat exchanges simulation to track surface hoar occurrences.

INTRODUCTION

Since the winter 93/94, the UBC Avalanche Research Group has been testing the snow cover numerical model Crocus in the Selkirk Mountains in western Canada. The aim of this ongoing project is to assess the suitability of the model for operational avalanche forecasting in a transitional snow climate (Armstrong and Armstrong, 1987). Crocus, developed by the *Centre d'Étude de la Neige* in Grenoble - France, was designed to simulate energy and mass evolution of the snow-pack as a function of meteorological conditions (Brun and Al. 1989, 1992). The approach of the tests was to compare field profiles and simulations with a particular attention to the main parameters relevant to operational avalanche forecasting.

¹UBC Avalanche Research Group, University of British Columbia - Department of Civil Engineering,
2324 Main Mall, Vancouver BC, V6T 1Z4, Canada. Fax: (1) (604) 822 6901 -
Email: laurent@civil.ubc.ca.

IMPORTANT FACTORS FOR AVALANCHE FORECASTING

The nature of factors that can be used for avalanche forecasting can be regrouped into three classes (McClung and Schaerer, 1993). In class-III are found the meteorological factors, while class-II regroups the snow-pack factors and class-I the stability factors. In class-II, information is obtained in doing a full snow profile. Stability is not directly tested but is estimated from the knowledge of the physical parameters measured within the snow-pack. Assessing a model like Crocus, must first require to make sure the class-II factors are correctly simulated, in order to provide relevant information for the eventual stability evaluation. Among snow-pack parameters, some of them are primary important. First of them: the hardness, because it allows the forecaster to deduce the slab structure and to recognize weak layers.

Another key parameter is the type of grains. Three of them call for a particular attention: depth hoar, faceted grains and surface hoar, because of their abilities in creating layers with low strength or propagating fractures.

Temperature profiles are also important cause they are at the origin of the type and magnitude of the metamorphism within the snow-pack. Nevertheless, since Crocus uses both temperature and temperature gradient to govern the type of metamorphism grains undergo, this parameter is essential to look after. Liquid-water content is also a significant parameter to consider, but like most of the available profiles presented dry conditions, testing is limited. On a lesser extent, density is also a parameter to observe, but is not considered as of a primary importance to retrace slab structure.

EXPERIMENTAL SITE

The measurements necessary to run the model were conducted at Mount Fidelity in Glacier National Park. This instrumented site (1910m) hosts one of the study plots maintained by the Parks Canada's avalanche control staff. In these regions the snow-pack is usually deep and temperatures are such that depth hoar is generally absent due to too weak temperature gradients. Nevertheless, facets can form during the coldest periods as well as surface hoar if clearings occur.

The hourly meteorological input required by the model were automatically collected, except for the new snow density. The study plot was visited every day to collect current snow and weather observations providing the model with fresh snow density and with checking of the automatic measurements. Regular snow profiles were also obtained at the study plot.

SNOW DEPTH

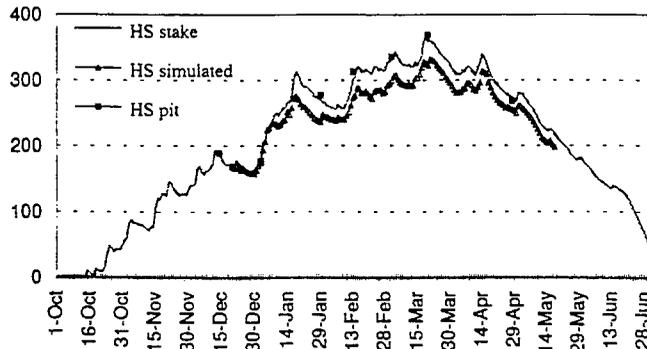


Figure 1: Snow depth simulation. Initialization on 20 Dec 93.

Figure 1 shows the simulation of the snow depth compared to the actual depth, after initializing the model the 20 December 1993. Although all the features of the observation curves are quite well simulated, we see a well marked gap between both curves originating during an intense snowfall period between the 3 and 18 January 1994. The settlement scheme is believed to be responsible for this, since no deficiency of the snow gauge was observed, and no particular strong wind recorded. Nevertheless, precision remains in the satisfactory range of 10%. The model was then reinitialized on 29 January 1994. Simulation was run until mid-May and shows excellent performance for accumulation, settlement and melting as presented on Figure 2. The only slight mismatches are due to occasional measurement errors caused by the snow gauge.

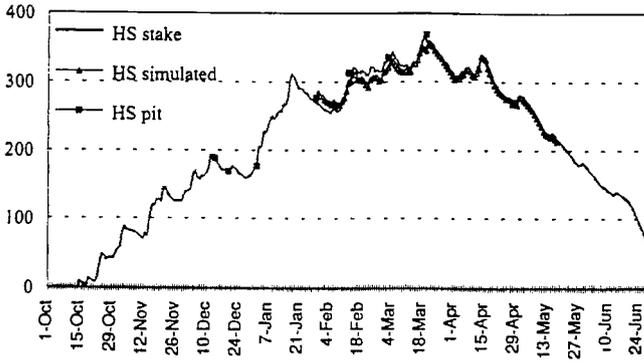


Figure 2: Snow depth simulation. Initialization on 29 Jan 94.

TEMPERATURE AND DENSITY PROFILES

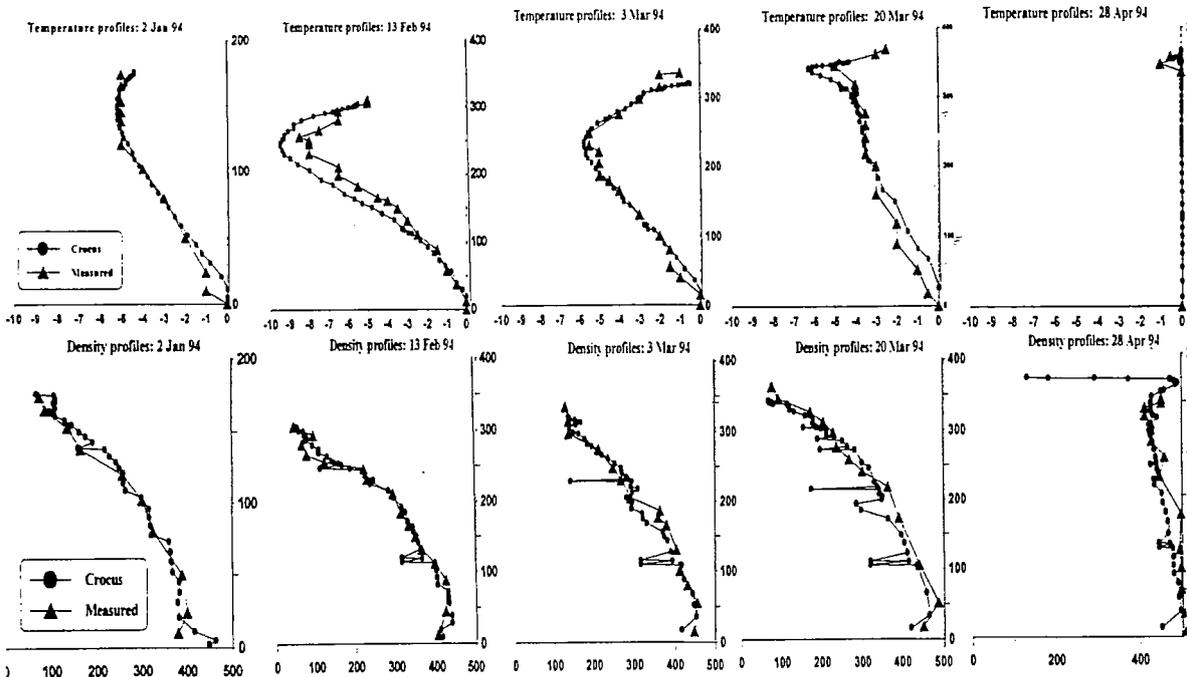


Figure 3: temperature and density profiles

Figure 3 exhibits outstanding performances of the model with respect to temperature and density profiles without re-initialization after the 29 January 1994. The few peaks which are spotted on the density profiles are due to buried surface hoar.

GRAIN METAMORPHISM

To perform the grain type simulation it has been necessary to introduce continuous parameters into the model resulting in the concept of dendricity and sphericity (Brun and Al. 1992).

-5deg/m is the threshold used in the model to differentiate the type of metamorphism a given layer will experience. To ease the comparison, grain types were grouped by ranges of sphericity, dendricity and size. Liquid water content and history of every layers - indicating whether a layer was previously frozen - were also used to classify each grain type. Figure 4 describes the main grain types with respect to sphericity and dendricity.

Profiles are compared on Figure 5. An important mismatch occurs in the 2 January 1994 profiles. After new initialization on 29 January, the simulated profiles show generally much better agreement. Frozen crusts at 320cm and 310cm are also well reproduced the 20 March. By looking more carefully at the profiles of 13 February, 3 March and 20 March, we observe that in the sequence of intermediate states where crystals are found, the simulation produces grain types with lower sphericities than expected.

Even if in some cases this trend does not affect too much the performance, this seems to characterize a bias in the metamorphism scheme which can lead to poor simulation like also in the first 1995 available profile the 23 January 1995. When checking the daily evolution of the different simulated temperature profiles (not shown here), the problem seems to originate from layers where the gradient flirts with the threshold value used by the model while, if the magnitude is greater - like -7 -10 deg/m - actual faceting is well picked up. On these profiles where simulation fails to ideally reproduce the snow-pack stratigraphy, grain size is, at contrary, very well reproduced. Results remain fairly consistent for other profiles. Considerable difference in the size occurring on 28 April is caused by the presence of conglomerates created by melt-freeze. Hence, the size measured on the field is rather representative of the conglomerate size than the individual grain somewhat difficult to evaluate.

SURFACE HOAR

An attempt was made to observe the capability of Crocus to simulate the heat exchanges at the surface of the snow-pack and deduce from them the occurrence of surface hoar. Figure 6 shows the simulated growth with the temperatures over the whole period of the test. Few major peaks can be observed. They simulate periods of important condensation. In Nature, unless the temperature is well below zero, condensation will be in the form of water droplets. As a result, all the major peaks - with a magnitude greater than 1 to 1.5 mg/cm²/h - found after March 1st can be ignored.

Surface hoar was observed at the site on the 20 and 21 January 94 and as well on the 29 January, 1, 3 and 5 February 1994. In the meantime, the growth simulation curve features major peaks matching these dates. Figure 7 shows the simulated ice growth curve with the prevailing meteorological conditions for part of January 94. Although the number of outgrowths is low over the winter, the curves allowed to detect surface hoar occurrences, demonstrating the potential of the model.

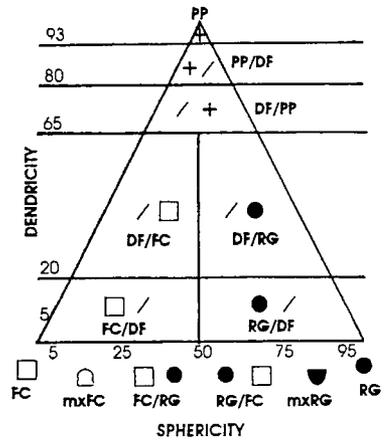


Figure 4: grain types defined with dendricity and sphericity.

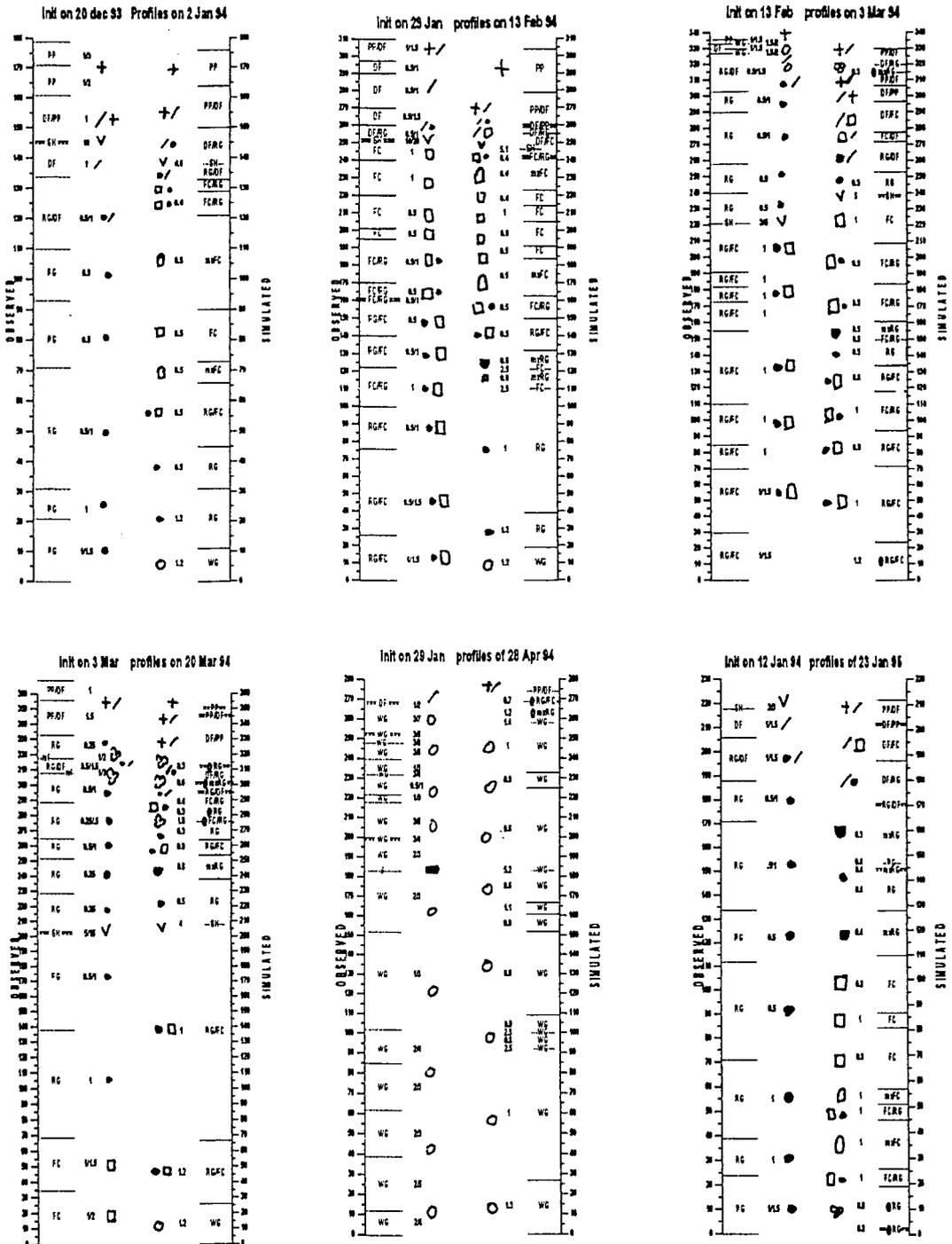


Figure 5: grain metamorphism. "@" indicates a layer previously wet.

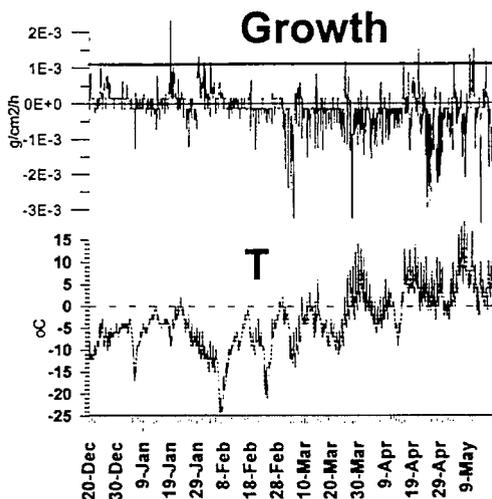


Figure 6: Simulated ice growth and prevailing temperature.

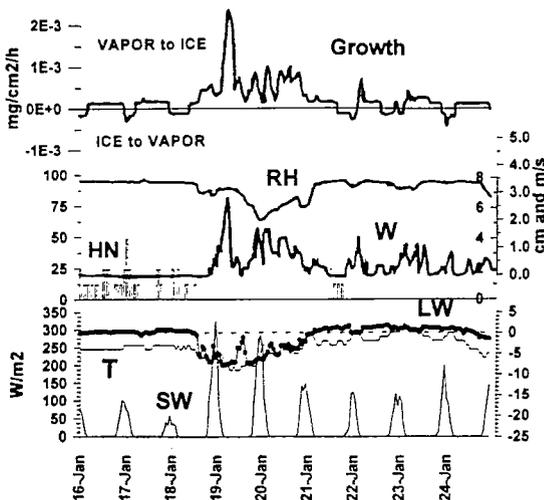


Figure 7: Simulated ice growth, January 1994.

CONCLUSION

The purpose of this paper was to show the results obtained with Crocus since the winter 93/94 to get a better idea of its suitability for operational avalanche forecasting. The study was undertaken in the particular climate of the Columbia Mountain and focus was given on the snow-pack parameters which are of a critical importance for stability evaluation and hence, for forecasting.

Results show very good performances for snow depth, density and temperature profiles. It is also demonstrated that modelisation of grain metamorphism in a natural snow-pack remains quite a challenging task with respect to the very high quality of information required for operational avalanche forecasting. Finally, the potential for simulating surface hoar is described and shows promising results. Full analysis of 94/95 data from two different sites should allow to finalize these results.

ACKNOWLEDGMENT

The author thanks the *Centre d'Étude de la Neige* for providing our group with the model. This project could not have been pursued without the great contribution of the Avalanche Control's staff of Glacier National Park at Rogers Pass, who supplied part of the observations necessary for the tests. The funding of this project was brought by the International Council for Canadian Studies and the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada.

REFERENCES

- Armstrong, R.L., and B.R. Armstrong, 1987 - *Snow and avalanche climates of the western united States: A comparison of maritime, intermountain and continental conditions*. IAHS publication No 162, pp281-294.
- Brun, E., Martin, E., Simon, V., Gendre, C., Coleou, C., 1989 - An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting. *Journal of glaciology*, Vol 35(121).
- Brun, E., David, P., Sudul, M. and Brunot, G., 1992 - A numerical model to simulate snow cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *Journal of glaciology*, Vol 38(128).
- McClung, D., Schaerer, P., *The Avalanche Handbook*. 1993 - The Mountaineers - Seattle.

Modélisation de la répartition spatiale de la neige transportée par le vent dans le système ELSA

M. Mases¹, L. Buisson¹, W. Frey²

RÉSUMÉ

ELSA est un système informatique destiné à aider les experts chargés de l'analyse de sites d'avalanches et, en particulier, à reproduire le raisonnement d'un spécialiste sur la zone de départ d'une avalanche.

En effet, pour pouvoir décrire toutes les caractéristiques de l'avalanche, l'analyse du site passe par le calcul des volumes de neige accumulés dans la zone de départ. Le vent joue un rôle essentiel dans ce processus et, par conséquent, dans la détermination des caractéristiques de l'avalanche.

Le système ELSA (Buisson et al, 1993) possède un module consacré au transport de la neige par le vent et, pour la première fois, les résultats de ce module ont été comparés avec des données réelles de terrain. Ces données proviennent d'un versant suisse, le Stillberg.

Les premières comparaisons modèle-terrain (basées sur le calcul d'un coefficient éolien) montrent que le logiciel est capable de déterminer si une surface donnée se trouve sur une zone d'accumulation ou d'érosion par rapport à un régime donné de vent, avec un taux de réussite d'environ 70%. La validation avec des données de terrain permet de faire quelques modifications sur les méthodes empiriques de calcul du coefficient éolien.

ABSTRACT

ELSA is a computer system which aims to support the snow specialists in charge of the analysis of avalanche paths. It particularly tries to imitate the reasoning of a specialist on the starting zone.

As a matter of fact, in order to get a full description of the avalanche, it is necessary to estimate the volume of snow on the starting zone. The wind plays a very large part in the distribution of the snow and, as a result, in the magnitude of the avalanche.

The ELSA system (Buisson et al, 1993) has a module which deals with snow drift and, for the first time, the results provided by this module are compared to field observations. These data come from Stillberg in Switzerland.

The first comparisons model-terrain (based on an eolian coefficient) show that the system is able to determine if a given terrain unit is located on an accumulation area or on an erosion area with a success rate equal to 70%.

This validation based on terrain data unit, allow the introduction of modifications in the empirical methods which compute the eolian coefficient.

INTRODUCTION

L'avalanche est un phénomène naturel qui peut être à l'origine de graves accidents et catastrophes. Les avalanches peuvent frapper les équipements ou les personnes directement. Ces accidents ont été de plus en plus fréquents dans les dernières décennies à cause de l'occupation hivernale, par l'homme, des zones de montagne qui autrefois étaient occupées seulement pendant l'été.

¹ Cemagref, Division Nivologie, 2 Rue de la Papeterie, Boîte postale 76, Saint Martin d'Heres, France.

² IFENA, Zweigstelle Flüelastrasse 11, CH-7260 Davos-Dorf, Suisse.

Les études sur les avalanches sont réalisées par des experts qui ont une bonne expérience et une connaissance approfondie de ce phénomène. Récemment, avec le développement de l'informatique, on a cherché à aider les experts chargés de l'analyse des sites d'avalanches en utilisant des systèmes informatiques qui imitent leur raisonnement. Ces logiciels sont appelés systèmes experts.

ELSA est un système expert qui imite le raisonnement d'un spécialiste pour réaliser l'analyse de la zone de départ d'un site d'avalanches et calculer différents paramètres de l'écoulement. Le système est composé de différents modules qui travaillent comme une chaîne, c'est-à-dire que les résultats d'un module peuvent être utilisés comme données d'entrée du module suivant (Fig. 1)

Les premiers modules que le logiciel met en œuvre sont ceux qui ont pour objet de décrire les caractéristiques de la zone de départ de l'avalanche. Cette analyse passe forcément par la détermination des hauteurs de neige dans la zone de départ. Celles-ci peuvent être très variées à cause du transport de neige par le vent (Föhn, 1983; Castelle, 1994); leur bonne détermination sera essentielle pour calculer les autres paramètres de l'avalanche. ELSA, actuellement, n'est pas encore calé et il faut le valider et l'améliorer. Il est donc nécessaire de comparer les résultats fournis par le système avec des données réelles de terrain.

Le module d'ELSA chargé de déterminer la répartition spatiale du transport de neige par le vent est l'objet du travail présenté ici.

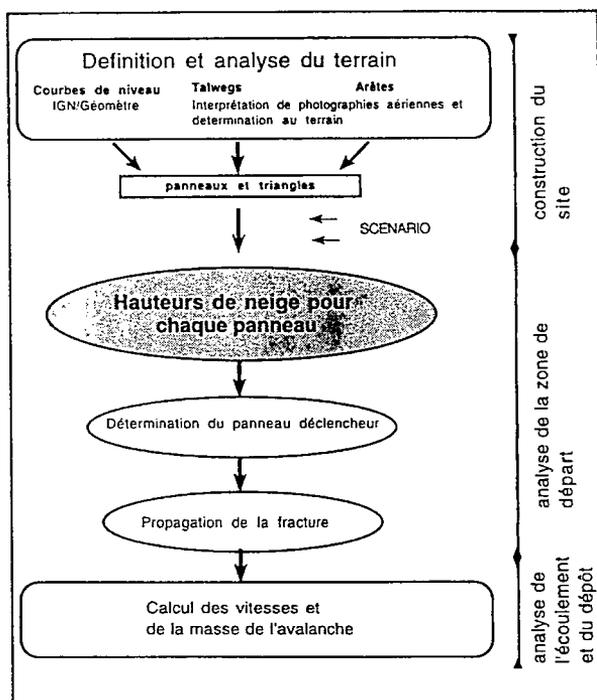


Fig. 1. Description des différents modules d'ELSA. Dans cet article, nous décrirons la validation du module de transport de neige par le vent.

Tous les calculs effectués par le système sont basés sur une simplification de la topographie du site. Pour la réaliser, ELSA utilise la topographie réelle sous la forme de courbes de niveau numérisées. Sur cette topographie, l'utilisateur définit des *panneaux* qui représentent chacun un morceau homogène de la surface du terrain, avec les mêmes caractéristiques de pente, rugosité, végétation, orientation, etc.

Chaque panneau est composé de triangles qui sont définis dans un repère cartésien. L'ensemble des triangles constitue la topologie de la zone d'accumulation. Sur la topographie, l'utilisateur détermine aussi les arêtes qui partagent la zone de départ en secteurs au vent et en secteurs sous le vent. Ces arêtes sont donc forcément des limites entre panneaux.

Nous obtenons ainsi une représentation du site divisé en panneaux, dont quelques uns sont limités par des arêtes.

Les panneaux qui se trouvent sous l'influence des arêtes sont ensuite déterminés par ELSA.

Pour chacun d'entre eux, ELSA calcule différents paramètres (Fig. 2) comme la distance horizontale entre l'arête et le centre de gravité du panneau ou l'angle d'incidence du vent sur l'arête. De cette façon, donc, chaque panneau est défini spatialement par sa position relative par rapport aux arêtes.

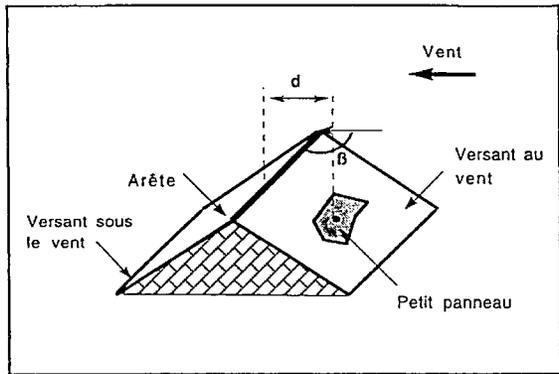


Fig. 2. Chaque panneau est positionné par rapport aux arêtes, d est la distance du centre de gravité du panneau à l'arête, et β l'angle d'incidence du vent sur l'arête.

LE MODULE DE TRANSPORT DE NEIGE PAR LE VENT DANS LE SYSTÈME ELSA

L'objectif de ce module est l'obtention, pour chaque panneau, de la hauteur de neige à la fin d'un épisode de transport. Pour cela le système prend en compte, le niveau de transport compris entre 0 (sans transport) et 15 (transport maxi), la précipitation neigeuse, la proportion du manteau neigeux érodable et surtout la position spatiale relative de chaque panneau par rapport aux arêtes.

Pour l'obtention de la hauteur de neige, ELSA se base sur le calcul d'un coefficient éolien (c) qui est attribué à chaque panneau.

Le coefficient éolien représente le rapport entre la neige transportable en place à la fin de l'épisode et la neige transportable disponible au cours de l'épisode.

Le calcul du coefficient c

Le calcul du coefficient c se fait à partir de la formule empirique suivante:

$$c = a_{\text{vent}} \cdot (g_{\text{arête}} \cdot g_{\text{orientation}} \cdot g_{\text{influence}}) g_{\text{altitude}} + b_{\text{vent}}$$

Chacun des paramètres de cette formule s'obtient à partir de règles expertes qui sont le fruit de la collaboration entre un informaticien et un expert en avalanches :

- a_{vent} et b_{vent} sont des coefficients de fonctions affines (pente et ordonnée à l'origine) qui dépendent du niveau de transport de la neige par le vent, défini pour chaque scénario. Pour un transport maximum, la valeur de a est 1 et celle de b vaut 0 de façon que $(g_{\text{arête}} \cdot g_{\text{orientation}} \cdot g_{\text{influence}}) g_{\text{altitude}}$ devienne la valeur de c ; dans les autres cas, l'effet du vent est atténué à l'aide d'une fonction affine.
- Pour le moment, dans ELSA, on ne prend en compte que trois types d'arêtes symétriques avec une efficacité différente vis-à-vis du transport; $g_{\text{arête}}$ dépend de cette efficacité. Il est compris entre 0,6 et 2,15.
- $g_{\text{orientation}}$ dépend de l'incidence du vent sur l'arête, il est calculé en prenant en compte l'orientation de l'arête et la direction du vent sur le site. Sa valeur est estimée entre 0,5 et 1,7.
- $g_{\text{influence}}$ détermine le niveau d'influence de l'arête sur un panneau donné. On considère évidemment qu'une arête aura une influence différente sur un panneau sous le vent que sur un panneau au vent. De la même façon, la distance entre l'arête et le panneau est prise en compte. Les fonctions utilisées pour calculer $g_{\text{influence}}$ sont des fonctions en escalier qui fournissent des valeurs comprises entre 0,6 et 1,65.
- g_{altitude} est un coefficient qui dépend de l'altitude où se trouve le panneau. Plus élevée est l'altitude, plus grand est le paramètre. Sa valeur est estimée entre 0,3 et 1.

Pour chaque panneau, la hauteur de neige est calculée à l'aide de la formule suivante (Fig. 3) :

$$h_2 = (1 - \alpha)h_1 + c(\alpha h_1 + p)$$

Où

h_2 = hauteur de neige sur le panneau à la fin de l'épisode;

h_1 = hauteur de neige sur le panneau au début de l'épisode;

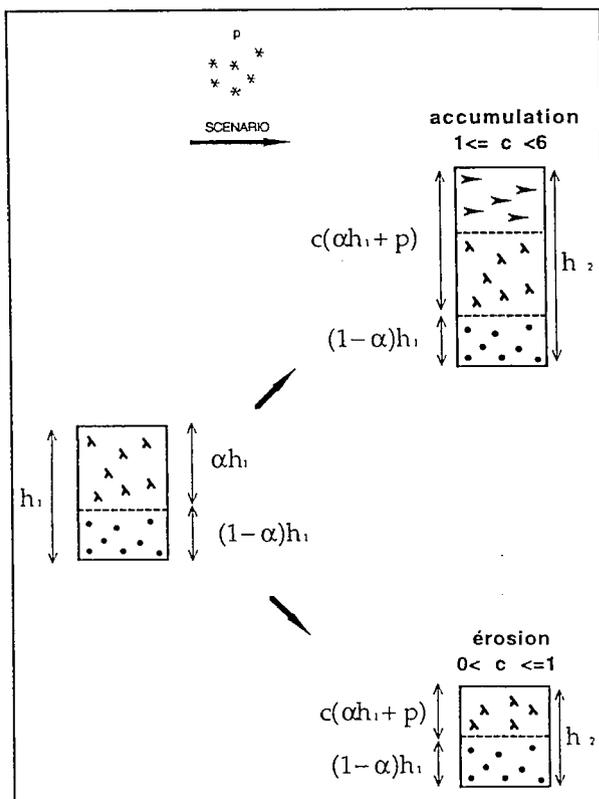
α = portion du manteau neigeux susceptible d'être érodé. Elle est supposée homogène sur le site;

c = coefficient éolien;

p = précipitation. Elle est considérée comme entièrement transportable.

Si le coefficient éolien est compris entre 0 et 1, le panneau est considéré comme balayé. S'il est supérieur à 1 (maximum de 6), la neige s'accumule sur le panneau.

Fig. 3. Pour chaque panneau un coefficient éolien est calculé.



PREMIERS TRAVAUX DE VALIDATION POUR ELSA.

Les données du Stillberg.

C'est la première fois que le module de transport de neige par le vent d'ELSA est testé avec plusieurs épisodes réels de transport de neige par le vent. Il est nécessaire de voir si le modèle s'adapte à des conditions réelles pour le rendre pleinement utilisable.

Pour réaliser ce travail nous disposons d'une série de 30 années de données nivo-météorologiques suisses (Rychetnik, 1983). Ces données appartiennent à l'IFENA (Institut Fédéral pour l'Etude de la Neige et des Avalanches) et ont été recueillies sur le versant du Stillberg dans la vallée de la Dischma près de Davos. Ce site est constitué d'une alternance de talwegs et d'arêtes qui dans certains cas, provoquent l'accumulation de la neige ou l'érosion à cause du vent. Sur le versant, il y a eu mise en place de deux réseaux successifs de perches pour mesurer la hauteur de neige et une série de capteurs de données nivo-météorologiques. Ce site est donc très intéressant pour l'étude de la répartition spatiale de la neige transportée par le vent.

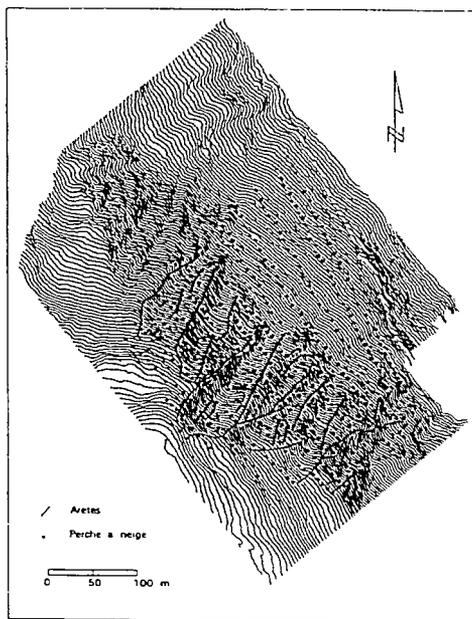
Avant de commencer la validation du modèle, il a fallu traiter les données qui se trouvaient sur des fichiers numériques, pour les visualiser et pour avoir une idée préliminaire sur la localisation des zones d'accumulation ou d'érosion préférentielles sur le site (Mases et al, 1995).

Tout d'abord, nous avons travaillé sur les données de hauteur de neige mesurées sur le réseau de perches (Fig. 4). Ces mesures ont été faites à des moments bien déterminés qui découpent un hiver en différents intervalles de temps. Ces intervalles de temps ne correspondent pas tous à des épisodes de transport de neige homogène (direction du vent, intensité du transport). Nous avons donc sélectionné les intervalles qui correspondent à des épisodes de transport et l'étude a été centrée sur eux. Pour visualiser les données nous avons réalisé des cartes de bilan de neige.

C'est la première fois que des cartes de ce type sont obtenues pour plusieurs épisodes avec des caractéristiques de transport très différentes.

Nous avons obtenu aussi des profils de hauteurs de neige perpendiculaires aux arêtes et parallèles à la direction du vent dominant. Par comparaison de ces documents avec la topographie nous avons obtenu différentes règles sur la distribution de la neige sur une topographie déterminée (Mases et al, 1995). Ces règles n'ont pas encore été utilisées dans ce travail.

Fig. 4. Topographie du site du Stillberg avec la représentation des arêtes et la localisation des perches pendant la période 1958-1975.



Analyse et premières modifications

La comparaison des données réelles avec les paramètres calculés a été faite au niveau des coefficients éoliens. Pour un épisode donné, nous avons calculé les coefficients éoliens à partir des données réelles et nous les avons comparés avec les coefficients calculés par ELSA.

Pour calculer c à partir de données réelles, il faut faire une série d'hypothèses. Initialement, nous avons considéré seulement les épisodes sans précipitation; nous avons estimé α à partir de la perche qui signale la plus grande érosion et cette valeur a été considérée comme homogène.

Tout d'abord, à partir de la comparaison, on a pu établir une première validation qualitative. Cette validation permet de voir si un panneau, qui dans le système ELSA est considéré comme balayé, se trouve bien dans la réalité sur une zone d'érosion, et le même raisonnement s'applique pour des panneaux avec un coefficient éolien supérieur à 1, c'est-à-dire sur une zone d'accumulation.

En général les résultats qualitatifs de cette validation sont satisfaisants. Environ 70% des points de mesure sont bien analysés par le logiciel (Fig. 5).

Les points mal analysés le sont à cause de différents types d'erreurs. Quelques uns, que nous considérons comme admissibles, proviennent de mesures qui se trouvent juste au-dessus d'une arête ou bien à la limite d'un panneau, ces erreurs sont difficiles à corriger. Elles sont liées à l'analyse spatiale du site.

D'autres erreurs, non admissibles, proviennent des méthodes empiriques d'estimation de la hauteur de neige et peuvent être améliorées. Nous détaillons les différentes observations réalisées.

- En général, les niveaux de transport sont sur-estimés. La gradation des niveaux est comprise entre 1 et 15 mais nous avons observé que les intensités du vent les plus fortes correspondent à des scénarios de niveau de transport 8. Nous avons donc recalé toute l'échelle vers le bas.
- ELSA sous-estime la largeur des dépôts accumulés derrière une arête.
- Le système d'arêtes ne prend pas en compte les ruptures de pente douce, qui provoquent des grandes accumulations, il faut donc prendre en compte, dans la représentation spatiale, ce nouveau paramètre.
- Le logiciel balaye très peu les panneaux sur les zones d'érosion, il faut donc augmenter $c_{influence}$: Les panneaux avec accumulation sont surchargés c'est-à-dire que les coefficients éoliens calculés apparaissent très élevés par rapport à des coefficients réels. Quelques modifications ont été faites dans ce sens (Fig. 5).

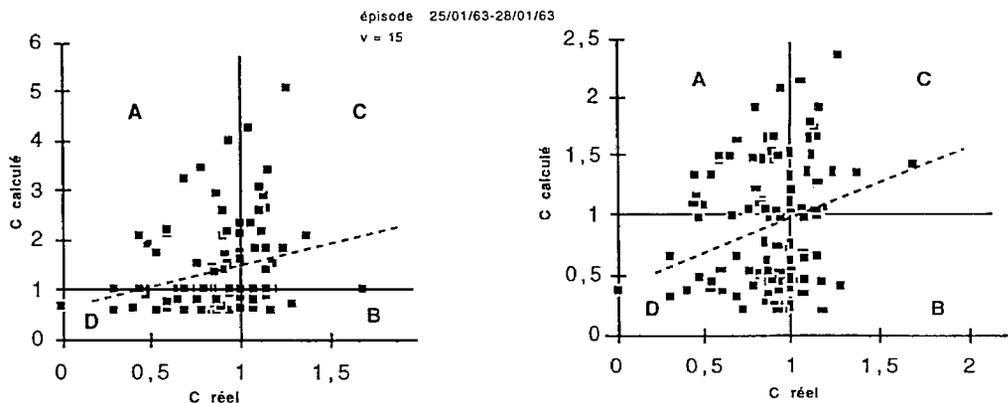


Fig. 5. Relation entre les valeurs des coefficients éoliens calculées par le logiciel ELSA et celles calculées à partir des données réelles. A gauche, on peut diviser le graphique en 4 secteurs : A, B-Points avec une mauvaise détermination du coefficient éolien. C- Points bien déterminés dans la zone d'accumulation. D- Points bien déterminés dans la zone d'érosion. Ici l'érosion calculée par ELSA est sous-estimée. A droite quelques modifications sur les méthodes empiriques de calcul ont été réalisées, la corrélation entre les coefficients éoliens apparaît meilleure.

CONCLUSIONS

Pour la première fois, les résultats du module de transport de neige par le vent du système expert ELSA ont été comparés avec des données réelles. Cette comparaison réalisée au niveau du coefficient éolien, permet de déterminer la précision du système et l'origine de ses erreurs.

Pour un épisode de vent donné ELSA est capable de déterminer qualitativement avec une réussite d'environ 70% si une surface topographique de haute montagne est située dans une zone d'érosion ou d'accumulation.

On peut considérer que les erreurs proviennent de deux origines différentes :

- Précision de la représentation du site.
- Méthodes empiriques de calcul du coefficient éolien. La poursuite des travaux sera consacrée à la correction de ces erreurs. Nous comptons utiliser de nouvelles règles.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Jirí Rychetník pour ses encouragements et le temps qu'il nous a consacré, Mario Roberetto de l'IFENA pour le travail, parfois ingrat, qu'il a bien voulu réaliser afin que nous puissions travailler sur les données du Stillberg, ainsi que Fabrice Moutte, Antonio Benedicto et Jean-Michel Taillandier pour la correction de l'article.

RÉFÉRENCES

- Buisson (L.), Charlier (C.). 1993. - Avalanche modelling and integration of expert knowledge in the ELSA system. *Annals of Glaciology*, Nr. 18. pp. 123-128.
- Castelle (T.), Sivardière (F.), Guyomarc'h (G.), Buisson (L.), Mérindol (L.). 1994. - Drifting snow phenomena and Slab avalanches. *International symposium on snow and related manifestations*. Manali, HP, India. A paraître.
- Mases (M.), Buisson (C.), Good (W.), Vilaplana (J.M.). 1995 - Etude de la répartition spatiale des effets du transport de neige par le vent; premiers travaux réalisés à partir de mesures systématiques sur le terrain. *Glaciologie et Nivologie. Etat des recherches et des connaissances à la fin du XX^e siècle. Colloque d'Hydrotechnique*. Grenoble, 15 et 16 février. pp. 33-42.
- Föhn (P.), Meister (R.). 1983 - Distribution of snow drifts on ridge slopes: measurements and theoretical approximations. *Annals of Glaciology*. Nr. 4. pp. 52-57.
- Rychetník (J.). 1983. - Lawinen auf der Versuchsfläche Stillberg 1959-1969. *Winterbericht des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung*, Weissfluhjoch 1981/82, Nr. 46. pp. 140-145.

A model of powder snow avalanches

Un modèle des avalanches poudreuses

P. Gauer¹

RÉSUMÉ

Le sujet de cette contribution est un modèle des avalanches poudreuses (ou avalanches à aérosol) basé sur la théorie des écoulements diphasiques. Les bilans de masse du fluide et des particules, du moment cinétique du mélange, de l'énergie turbulente et de la dissipation constituent la formulation mathématique du problème. En intégrant dans la direction normale par rapport au sol, l'on obtient un modèle simplifié qui sera illustré par des simulations numériques.

ABSTRACT

The presented model of powder snow avalanches is based on the theory of two-phase flows. The theory describing the motion involves the five balance equations for the mass of the fluid phase, the mass of the particle phase, the mixture momentum, the turbulent kinetic energy and the dissipation. From these balance equations a layer-averaged model is derived. Some numerical simulations will be presented.

INTRODUCTION

In landuse planning it is often desirable to know the pressure which a powder snow avalanche (PSA) exerts on obstacles. The prediction of quantitative values of the pressure requires a fully 3-dimensional description for the PSA. There are only few approaches to 3-dimensional models. The disadvantages of these models are the required memory size of the computer and the considerable amount of CPU time. On the other hand experts often require only a rough estimation of pressure, as one part of their report. In this case 0- or 1-dimensional models for PSAs can be very useful.

There are two major approaches for such simple models. The first considers the PSA as a cloud of dense fluid (suspension of snow particles). The buoyant force created by the density difference between the cloud and the ambient air is the driving force. This model can be described by the balance equations for the mass and the momentum taking into account the entrainment of air (Beghin & Olagne, 1991). Rapin (1992) also considers the entrainment of snow and assumes a certain amount of snow which will be entrained. The second approach is based on the theory of turbulent multi-phase flows and uses a balance equation for the snow particle concentration in addition to the balance equations above. This treatment has the advantage that erosion and deposition of snow can be considered separately. Erosion and deposition are major features of PSAs, consideration of which allows the explanation of reinforcing effects in PSAs (Parker et al. 1986, Fukushima & Parker, 1990).

¹Federal Institute for Snow and Avalanche Research, CH-7260 Davos-Weissfluhjoch, Switzerland.
phone: ++41 (0)81 4170 253 fax: ++41 (0)81 4170 220 e-mail: gauer@slf.ch

THE GOVERNING EQUATIONS

A PSA is a turbulent multi-phase flow, consisting of air as continuous phase and ice grains of different size as dispersed phase. Because of the complexity in the description of multi-phase flows, it is recommended to restrict oneself to a two-phase flow with ice grains of uniform size.

Our model equations are based on the Reynolds averaged equations for the mass balance of the fluid, mass balance of the ice particles and the momentum balance:

$$\nabla \cdot \hat{\mathbf{u}}_B \approx 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (c \hat{\mathbf{u}}_B) = - \nabla \cdot \left(\overline{\mathbf{u}'_B c'} + \mathbf{v}_s \frac{c}{1 + c R} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{p} \hat{\mathbf{u}}_B}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{p} \hat{\mathbf{u}}_B \otimes \hat{\mathbf{u}}_B) = - \nabla p + c \hat{\rho}^s \mathbf{g} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{P}} - \overline{\rho \mathbf{u}'_B \otimes \mathbf{u}'_B}) \quad (3)$$

$\hat{\mathbf{u}}_B$ barycentric-velocity; c particle concentration; \mathbf{v}_s velocity of the particles relative to the air, assumed to be constant; $\hat{\rho}^f$ density of the fluid; $\hat{\rho}^s$ density of the ice particle; $R = \frac{\hat{\rho}^f - \hat{\rho}^s}{\hat{\rho}^f}$ denotes the immersed specific gravity of the snow particles; \bar{p} density of the mixture; p is the reduced pressure ($p = p^* - p_{hydrostatic}$); viscous stress tensor $P_{ij} = \mu [(\partial_i u_j + \partial_j u_i) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u})\delta_{ij}]$.

Owing to the Reynolds stress $-\overline{\rho \mathbf{u}'_B \otimes \mathbf{u}'_B}$ and the turbulent flux $-\overline{\mathbf{u}'_B c'}$ on the right hand side, we require additional closing condition for the system above. In our case we use the $k - \epsilon$ model proposed by Rodi (1985). This model sets up equations for the balance of the turbulent kinetic energy $\overline{\rho k_i}$ and the dissipation $\rho \epsilon \equiv \overline{\mathbf{P}' : \nabla \mathbf{u}'_B}$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\rho k_i}}{\partial t} + \nabla \cdot (\overline{\rho k_i} \hat{\mathbf{u}}_B) = & \\ & - \nabla \cdot \overline{p' \mathbf{u}'_B} + \overline{p' \nabla \cdot \mathbf{u}'_B} + \nabla \cdot (\overline{\mathbf{P}' : \mathbf{u}'_B}) - \overline{\mathbf{P}' : \nabla \mathbf{u}'_B} - \\ & - \nabla \cdot (\overline{\rho k_i \mathbf{u}'_B}) + (\overline{-\rho \mathbf{u}'_B \otimes \mathbf{u}'_B}) : \nabla \hat{\mathbf{u}}_B + \hat{\rho}^s \mathbf{g} \cdot \overline{c' \mathbf{u}'_B} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \epsilon \hat{\mathbf{u}}_B) = & \nabla \cdot \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \nabla (\rho \epsilon) \right) + \\ & + c_{1\epsilon} \frac{\rho \epsilon}{\overline{\rho k_i}} \left((\overline{-\rho \mathbf{u}'_B \otimes \mathbf{u}'_B}) : \nabla \hat{\mathbf{u}}_B + \hat{\rho}^s \mathbf{g} \cdot \overline{c' \mathbf{u}'_B} \right) (1 + c_{3\epsilon} R_f) - c_{2\epsilon} \frac{(\rho \epsilon)^2}{\overline{\rho k_i}} \end{aligned} \quad (5)$$

R_f is the flux Richardson number defined by Rodi; the empirical constants are chosen as follows:

c_μ	$c_{1\epsilon}$	$c_{2\epsilon}$	$c_{3\epsilon}$	σ_k	σ_ϵ
0,09	1,44	1,92	0,8	1,0	1,3

AVERAGE FORMULATION FOR LONG GRAVITY CURRENTS AND DENSITY CLOUDS

It is common in the theory of PSAs to distinguish between so-called long gravity currents and density clouds (see figure 1). In the first case a solution of the steady state is obtained, whereas in the second case one looks for a time-dependent solution. For both cases we can derive an averaged formulation from the equations above. This formulation refers to a height averaging for long gravity currents and to a volume averaging for density clouds. We consider a wide avalanche, so we can ignore the change across the current ($\frac{\partial}{\partial y} \approx 0$). In both cases we make use

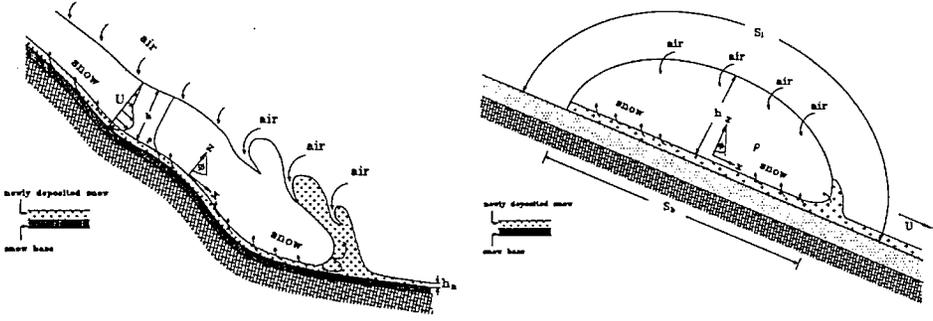


Figure 1: Sketch of a PSA as long gravity current and as density cloud

of a similarity assumption and assume shape factors of unity.

In practice the most import way of looking at a PSA is regarding a (relatively short) selfsimilar body of variable mass and volume, composed of snow grains and air. The shape of the avalanche is assumed to be a half-ellipse. So the cross sectional area is given by $A=\xi_A h^2$ (h height of the avalanche) and the length of the lower boundary, S_b , and of the upper boundary, S_i , can be written as $S_b=\xi_b h$ and $S_i=\xi_i h$, respectively. ξ_A , ξ_i and ξ_b are shape factors of the half-ellipse which can be expressed as

$$\xi_A = \frac{\pi}{4} \xi_b \quad ; \quad \xi_i = \frac{\pi}{\sqrt{8}} \xi_b \sqrt{4\xi_b^{-2} + 1} \quad ; \quad \xi_b = 6.5 \phi^{-0.27} \quad . \quad (6)$$

This definition suggests that the shape factors are functions of the local slope angle ϕ . The relation for ξ_b is derived from experimental data given by Beghin et al. (1981).

The aim now is to obtain a volume-integrated formulation for the balance equations (1) – (5). For example the mass balance of the mixture is given by

$$\frac{d\rho A}{dt} = \hat{\rho}^f a_{ii} S_i + \hat{\rho}^f a_{ib} S_b + \hat{\rho}^s C_F S_b \quad (7)$$

where $\hat{\rho}^f a_{ii} + \hat{\rho}^f a_{ib}$ is the mass flux of air through the upper boundary S_i and lower boundary S_b , respectively. $\hat{\rho}^s C_F$ denotes the mass flux of snow through the lower boundary.

$C_F = F_b - \frac{v_s c_b \cos \phi}{1 + R c_b}$ net entrainment of snow; F_b turbulent entrainment of snow; c_b ice particle concentration at the base; $1 - \lambda$ porosity of the snow pack.

This equation can be rewritten using the expression for the shape factors (6) and

$$\hat{\rho}^f a_{ib} = \hat{\rho}^f (1 - \lambda) \frac{C_F}{\lambda} \quad . \quad (8)$$

We obtain

$$2h\xi_A \frac{dh}{dt} = a_{ii} S_i + \frac{C_F}{\lambda} S_b - \frac{\pi}{4} h^2 \frac{d\xi_b}{dt} \quad . \quad (9)$$

In the same manner we can derive the expressions for the mass balance of the snow, the momentum balance of the mixture, the balance of the turbulent kinetic energy and of the dissipation. We obtain a system of ordinary differential equations in time.

$$A \frac{dC}{dt} = C_F S_b - C \left(a_{li} S_l + \frac{C_F}{\lambda} S_b \right) ; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (\rho + k_v \hat{\rho}^f) A \frac{dU}{dt} = & - (\tau_b S_b + \tau_l S_l) + \Delta \rho C A g \sin \phi - \\ & - \hat{\rho}^f U \left((1 + k_v) \left(a_{li} S_l + \frac{C_F}{\lambda} S_b \right) + R C_F S_b \right) - \hat{\rho}^f U A \frac{dk_v}{dt} ; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (\rho + k_v \hat{\rho}^f) A \frac{dK_t}{dt} = & P A + (f_{xz} \sin \phi - \cos \phi) G A - \rho \epsilon A - \\ & - \hat{\rho}^f K_t \left((1 + k_v) \left(a_{li} S_l + \frac{C_F}{\lambda} S_b \right) + R C_F S_b \right) - \hat{\rho}^f K_t A \frac{dk_v}{dt} ; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} (\rho + k_v \hat{\rho}^f) A \frac{d\epsilon}{dt} = & c_1 \epsilon \frac{\epsilon}{K_t} \left(P A + (f_{xz} \sin \phi - \cos \phi) G A \right) (1 + c_{3\epsilon} R_f) - c_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{K_t} A - \\ & - \hat{\rho}^f \epsilon \left((1 + k_v) \left(a_{li} S_l + \frac{C_F}{\lambda} S_b \right) + R C_F S_b \right) - \hat{\rho}^f \epsilon A \frac{dk_v}{dt} ; \end{aligned} \quad (13)$$

where we use the abbreviations

$$P A = U (\tau_b S_b + \tau_l S_l) + \frac{1}{2} \hat{\rho}^f U^2 \left((1 + k_v) \left(a_{li} S_l + \frac{C_F}{\lambda} S_b \right) + R C_F S_b + A \frac{dk_v}{dt} \right) ; \quad (14)$$

$$G A = \Delta \rho g \left(\frac{A}{3} \left(C_F \frac{\lambda - C}{\lambda} - C a_{li} \sqrt{4 \xi_b^{-2} + 1} \right) + \frac{v_s C A \cos \phi}{1 + R C} \right) ; \quad (15)$$

$$f_{xz} = - \operatorname{sign} \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \text{ and } \Delta \rho = \hat{\rho}^s - \hat{\rho}^f . \quad (16)$$

The coefficient of the virtual mass is defined by $k_v = 2/\xi_b$. In analogy with Rodi (1985), the flux Richardson number appearing in the dissipation equation 13 is defined as

$$R_f = - \frac{G A \cos \phi}{P A + (f_{xz} \sin \phi - \cos \phi) G A} . \quad (17)$$

Solving this system requires the knowlegde of a_{li} , F_b and the shear stress τ . We use the ansatz:

$$a_{li} = e_w U , \quad (18)$$

where the coefficient of air entrainment

$$e_w = 0.1 \frac{\phi}{90^\circ} \quad (19)$$

was proposed by Fukushima & Parker (1990), but little is known about this rate of air entrainment and the turbulent entrainment of snow. Here we use the relation

$$F_b = E_s v_s . \quad (20)$$

E_s is given by:

$$E_s = \begin{cases} 0 & \text{for } Z < Z_c \text{ ;} \\ 5.2 \cdot 10^{-5} Z^{1.74} & \text{for } Z > Z_c \text{ .} \end{cases} \quad (21)$$

where $Z = \sqrt{R_p} \mu$; $\mu = \frac{\sqrt{\tau_c l}}{v_s}$ and $R_p = \frac{\sqrt{R g d_s}}{v}$.

$$Z_c = \sqrt{R_p} \frac{\sqrt{\tau_c l \rho}}{v_s} \quad (22)$$

is the threshold, where the critical shear stress τ_c might be a function of the slope angle and of the snow properties. The expression for E_s was derived from experimental data given by Parker et al. (1986). For the shear stress we use a relation $\tau = f(\rho K_t)$.

In a similar way as for density clouds, we can derive a height averaged formulation for the model of a long gravity current. In this case we obtain a system of ordinary differential equations in space. Both equation systems can be solved using a Runge-Kutta scheme and are easily implemented on a PC.

A more complete description of the model equations is in preparation (see also Gauer, 1994).

NUMERICAL SIMULATIONS

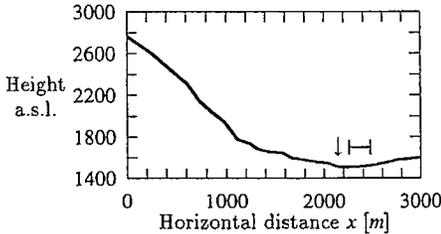


Figure 2: Longitudinal section along the estimated course of the PSA at Albristhorn

A PSA occurred at Albristhorn, Adelboden, Switzerland, at 20.15h on 30 January 1995. A longitudinal section along the course of the PSA is shown in figure 2. The PSA had a dense slab avalanche at its core, which stopped at $x=2150\text{ m}$ (\downarrow). Between the points $x=2250\text{ m}$ and $x=2500\text{ m}$ (---), the PSA caused a forest damage.

Various simulations of this event have been carried out. Figure 3 shows the development of the avalanche height, of the velocity and of the pressure along the running distance, where the PSA is regarded as a long gravity

current. The results are reasonable and the pressure is in the correct range to explain the destructive effects. The steep increase in height h at $l \approx 3000\text{ m}$ can be attributed to the increase of $\mathcal{R}i \geq 1$. In this case additional terms have to be taken into account, which are here disregarded.

Similar simulations have been carried out with the model for density clouds. Some results are given in figure 4. It shows three runs with different assumptions. First we assume an initial cloud with height of 10 m and a density of 1.55 kg/m^3 , then we assume a cloud with an initial density of 10.2 kg/m^3 . In contrast to the first assumption the initial density in the second case is quite high. The initial turbulence level is not sufficient to keep all the particles in suspension, so deposition takes place. This can explain the pressure peak at the beginning. If the turbulence reaches a certain value the erosion exceeds the deposition and the particle concentration increases again. In both cases the pressure is high enough to explain the destruction. In the third run we assume again a cloud with initial density of 10.2 kg/m^3 , but we use a model for single-phase flow. Here

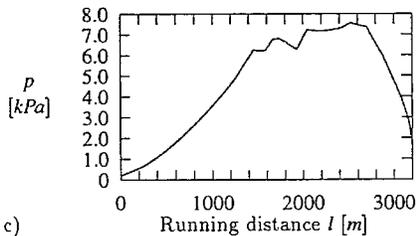
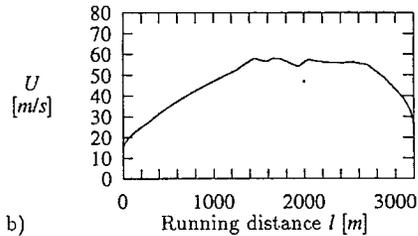
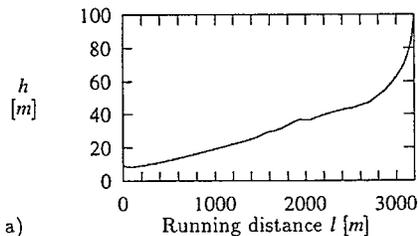


Figure 3: *Development of the height (a), the velocity (b) and the pressure (c) for a PSA regarded as a long gravity current. (Initial state: $U_0=15$ m/s; $h_0=10$ m; $\rho_0=1.55$ kg/m³)*

the cloud will be diluted rapidly. In this case the destruction of the forest at $x \approx 2400$ m can not be explained.

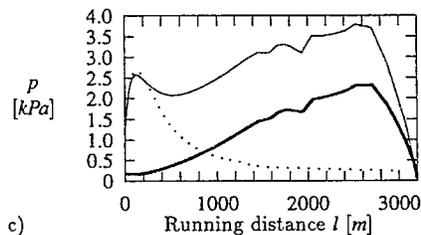
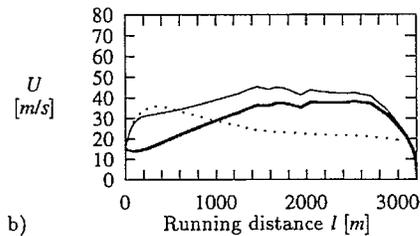
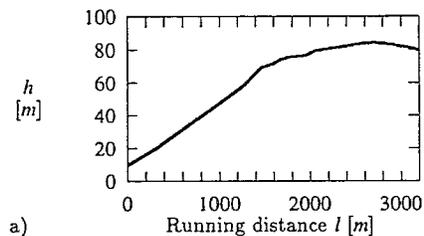


Figure 4: *Development of the height (a), the velocity (b) and the pressure (c) for a PSA regarded as a density cloud. (Initial state: $U_0=15$ m/s; $h_0=10$ m; — $\rho_0=1.55$ kg/m³; - - $\rho_0=10.2$ kg/m³; ··· simulation of a single phase flow $\rho_0=10.2$ kg/m³)*

CONCLUDING REMARKS

The presented model is a step toward a simple model for PSAs, which can be useful in landuse planning. Like all non-3-dimensional models this model is restricted to simple topographies. The critical points of the model are the poorly known rates of air and snow entrainment. Experimental data is available only for density clouds and gravity currents in water, but not for PSAs where the density ratio of particles and fluid is two orders of magnitude higher. The advantage of the presented model compared with models based on single-phase flow is the dynamic treatment of erosion and deposition which are major features of PSAs already mentioned.

ACKNOWLEDGEMENTS

I thank Kolumban Hutter, who awakened my interest in PSAs, and Dieter Issler, who encouraged me to present the model.

REFERENCES

- Beghin (P.), Hopfinger, (E.J.) and Britter, (R.E.), (1991) – Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries. *Journal of Fluid Mechanics* 107: 407 – 422
- Beghin (P.) and Olagne, (X.), (1991) – Experimental and theoretical study of the dynamics of powder snow avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 19: 317–326
- Fukushima (Y.) and Parker (G.), (1990) – Numerical simulation of powder-snow avalanches. *Journal of Glaciology*, 36: 229 – 237
- Gauer (P.), (April 1994) – Bewegung einer Staublawine längs eines Berghangs. Diploma thesis, TH-Darmstadt, Institut für Mechanik (III), Hochschulstrasse 1, D-64289 Darmstadt, Germany, (unpublished)
- Parker (G.), Fukushima (Y.) and Pantin (H.M.), (1985) – Prediction of ignitive turbidity currents in Scripps submarine canyon. *Marine Geology*, 67: 55 – 81
- Parker (G.), Fukushima (Y.) and Pantin (H.M.), (1986) – Self-accelerating turbidity currents. *Journal of Fluid Mechanics*, 171: 145 – 181
- Rodi (W.), (1985) – *Turbulence and diffusion in stable environments*, chapter Calculation of stably stratified shear flows with a buoyancy-extended $k - \epsilon$ turbulence model, pages 111–140. Number 4 in New Series. Oxford Science Publications

Calculation methods for avalanche run-out distance for the Austrian Alps - Méthodes de calcul des distances d'arrêt des avalanches dans les Alpes autrichiennes

K. Lied¹, C. Weiler², S. Bakkehøi¹, J. Hopf³

ABSTRACT

Runout distance for the flowing component of 80 extreme avalanches in Austria is calculated based on topographical parameters from the avalanche paths. The results are compared with calculations performed by dynamic models. Eleven terrain parameters are studied, applying 21 independent combinations of these parameters as variables. The four best combinations of variables are used in the equations for avalanche runout calculation. These variables are: average gradient of avalanche track β , gradient of rupture zone θ , second derivative y'' of the avalanche path, described by a second-degree function, and total vertical displacement of the avalanche, H . The equation

$$\alpha = 0.97 \cdot \beta - 0.7 \cdot 10^1 \cdot \theta - 0.32 \cdot 10^1 \cdot y'' + 0.6 \cdot 10^6 H \cdot y'' \cdot \theta + 1.54$$

has a correlation coefficient $R = 0.97$ and standard deviation $S = 1.3^\circ$. This close relationship makes it possible to calculate the most probable runout based on objective terrain parameters.

Méthodes de calcul pour la course d'avalanches dans les Alpes autrichiennes

RESUME

Les courses de la portion en mouvement dans le cas de 80 avalanches extrêmes en Autriche ont été calculées à partir des paramètres topographiques le long du parcours des avalanches. Les résultats ont été comparés aux calculs faits avec des modèles dynamiques. Onze paramètres de terrain ont été considérés, appliquant 21 permutations de ces paramètres comme variables. Les quatre meilleures combinaisons de variables ont alors été utilisées dans les équations calculant la course des avalanches. Ces variables sont: gradient moyen du tracé de l'avalanche β , gradient de la zone de rupture θ , dérivée seconde y'' du tracé de l'avalanche décrit par une fonction du second degré, et déplacement total vertical de l'avalanche, H . L'équation

$$\alpha = 0.97 \cdot \beta - 0.7 \cdot 10^1 \cdot \theta - 0.32 \cdot 10^1 \cdot y'' + 0.6 \cdot 10^6 H \cdot y'' \cdot \theta + 1.54$$

a un coefficient de corrélation R de 0.97 and un écart-type de 1.3 . Cette bonne corrélation permet donc de calculer la course la plus probable à partir des paramètres objectifs de terrain.

INTRODUCTION

The intention of this work is to investigate whether the topographical/statistical method for snow avalanche runout calculation developed by NGI (Lied, Bakkehøi 1980, Bakkehøi, Domaas, Lied, 1983) is applicable for avalanches in the Austrian Alps, where climate and topographical conditions are different from Scandinavia. A joint project for this study was established between the Austrian Avalanche and Torrent Control, Section Tirol (WLV), and the Norwegian Geotechnical Institute (NGI) in 1993.

¹) Norwegian Geotechnical Institute, NGI, P.o. box 3930 Ullevål Hageby
N-0806 OSLO, NORWAY

²) Ing. Büro, Chr. Klenkhart, Kaiserjägerstrasse 34 6020 INNSBRUCK, AUSTRIA

³) Wildbach und Lawinenverbauung, Sektion Tirol, Liebeneggstrasse 11
6020 INNSBRUCK, AUSTRIA

FIELD OBSERVATIONS AND DATA

This study is based on a registration of 80 avalanches in Austria (Klenkhardt/ Weiler, 1994). The majority of these avalanches occur in populated areas of Vorarlberg, Tirol, Salzburg and Kärnten. The extreme run-outs of these 80 dense flow avalanches are well-known. The frequency of the avalanches is in the order of 1 per 100 years or lower, and the avalanches are regarded to have occurred near their maximum extent. Each avalanche is plotted on a map, scale 1:25.000 and 1:5000. The following parameters were chosen (Fig. 1):

- (1) Average gradient of the avalanche path α (in $^{\circ}$)
- (2) Average gradient of the avalanche track β (in $^{\circ}$)
- (3) Inclination of the starting zone θ (in $^{\circ}$)
- (4) Total vertical fall height H (in m)
- (5) Maximum width of observed rupture in the starting zone R_{\max} (m)
- (6) Minimum width of track between starting and run-out zone T_{\min} (m)
- (7) Maximum observed width of avalanche deposit in the run-out zone D_{\max} (m)
- (8) Horizontal length of starting zone L_1 (m)
- (9) Horizontal length of avalanche track L_2 (m)
- (10) Horizontal length of run-out zone L_3 (m)
- (11) Length/Width-Quotient in the starting zone L_1/R_{\max}
- (12) Second derivative of the slope function y''

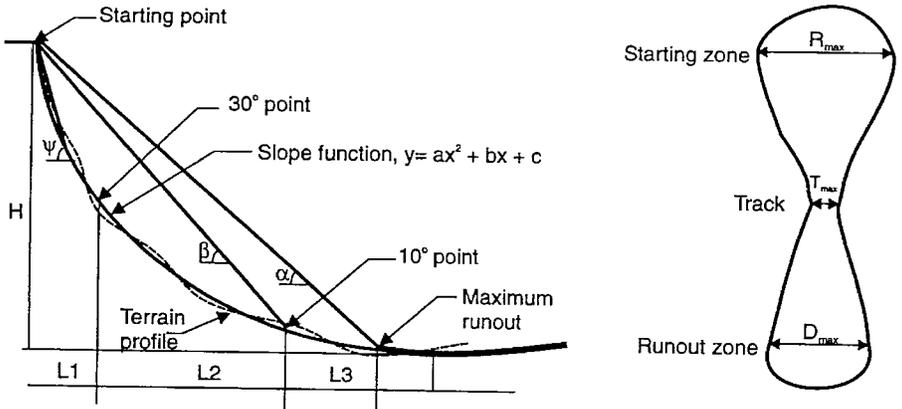


Fig.1 Definition of terrain parameters

RESULTS AND DISCUSSIONS

The variable β (average gradient of avalanche track) is the dominating factor in the prediction of α . This parameter was chosen to give a simplified expression of the track gradient, because it is evident that α angles are in a way connected to the general gradient of the avalanche slope. The following relation was found by regression analysis for Norway (4), and Austria (5).

$$\begin{aligned} \text{Norway:} \quad \alpha &= 0.96 \cdot \beta - 1.4^{\circ}, & R &= 0.92, S = 2.3^{\circ} & (4) \\ \text{Austria:} \quad \alpha &= 0.946 \cdot \beta - 0.83^{\circ}, & R &= 0.96, S = 1.5^{\circ} & (5) \end{aligned}$$

This close relation between α and β indicates that the terrain profile of the avalanche track is an important parameter for calculation of run-out distance. It can be seen from the two equations that the result in terms of both R-value and S-value, are better for the Austrian, than for the Norwegian avalanches which might be due to a more homogenous sample of avalanches.

The results for the two countries are very similar. The differences varies between +0.3% and +1.6% by calculating with β -values between 35° and 20°. Based on these equations, avalanches in Norway have a slightly longer runout than in Austria, in terms of α -angle. By aplying 21 independant combinations of the 11 terrain parameters, the following regression equation was found:

$$\alpha = 0.97 \cdot \beta - 0.7 \cdot 10^{-1} \cdot \theta - 0.32 \cdot 10^{-1} \cdot y'' + 0.6 \cdot 10^{-6} \cdot H \cdot y'' \cdot \theta + 1.54^\circ \quad (6)$$

$$R = 0.97, \quad S = 1.3^\circ$$

which is somewhat better than the results from the two-parameter model. As can be seen from the equation, only parameters connected to the path profile is of any importance to the runout.

Degree of confinement between starting zone, track and run-out zone

Concentration, or confinement of the avalanche between the rupture zone and track has been regarded as a factor giving avalanches long run-out distances. According to Voellmy's theory of avalanche movement a confined avalanche track will increase the velocity due to a greater flow height. As shown earlier in this paper, and in earlier works with the topographical model, confinement of the avalanche does not seem to be an important predictor to the avalanche runout. For further investigation on this matter, the 80 avalanches from this study were grouped into three classes of confinement. The confinement was investigated between:

- starting zone/avalanche track
- avalanche track/runout zone

Degree of confinement between starting zone and track, results:

Class 1: $R_{max}/T_{min} < 3/2$, unconfined:

$$\alpha = 0.93 \cdot \beta - 0.67^\circ \quad S = 1.5^\circ; \quad R = 0.91 \quad (7)$$

Class 2: $3/2 \leq R_{max}/T_{min} < 3/1$, medium confined:

$$\alpha = 0.98 \cdot \beta - 2.13^\circ \quad S = 1.7^\circ; \quad R = 0.95 \quad (8)$$

Class 3: $3/1 \leq R_{max}/T_{min}$, strongly confined:

$$\alpha = 0.98 \cdot \beta - 1.27^\circ \quad S = 1.1^\circ; \quad R = 0.97 \quad (9)$$

Unconfined and medium confined avalanches obtain nearly the same runout. Strongly confined avalanches (Class 3) seems to have slightly shorter runouts. As the β -angle increases, unconfined avalanches obtain longer runouts in relation to more confined avalanches. The reason why the confined avalanches do not obtain longer runout distances than unconfined, must be explained by the process of compression of the avalanche mass, and thereby by the increased friction which takes place in a confined track. In addition, such tracks are often rugged and curved, which causes a higher resistance to motion and thereby a reduced runout distance.

Avalanche run-out and climatic regions

The 80 avalanches are located to five different climatic regions. 85% of the avalanches are situated in two of these regions.

The influence of climate on the runout distance was discussed by McClung et al. (1989), and different runout lengths were found for different climatic regions. For return periods in the order of 100 years, it is logical that different climatic regions will create avalanches with different runout lengths. In an infinite time scale though, one should expect equal runout lengths in all climatic zones where avalanches occur.

The two climatic regions where 85% of the avalanches are found, are defined as follows:

Climate region 1 (CR 1):

Mountain-climate in the middle and upper valleys of the central Alps.

The climate is characterized by a long cold winter season (inversions, flowing of cold air) and low precipitation.

Climate region 2 (CR 2):

Mountain-climate with heavier precipitation than type 1, located to the middle and upper valleys of the northern limestone Alps, in valleys near the highest line of the Alps, as well as in the southern limestone Alps and in some southern foothills of the central Alps.

The following equations were found by regression analysis of the avalanches in the two climatic regions:

CR 1: Two parameters:

$$\alpha = 0.79 \cdot \beta + 3.94^\circ \quad (10)$$

$$S = 0.83^\circ; R = 0.97$$

CR 2: Two parameters:

$$\alpha = 0.98 \cdot \beta - 2.1^\circ \quad (11)$$

$$S = 1.6^\circ; R = 0.95$$

There is a pronounced difference in avalanche runout distance between the two climatic regions for avalanches with low β -values, but the differences in runout seems to decrease as the avalanche tracks gets steeper. In CR 2, both the avalanche volumes, fracture heights and frequencies are generally greater than in CR 1, because of higher precipitation. This might be the explanation for longer runout.

THE "NEAREST NEIGHBOUR" MODEL

By using the topographic data from all the avalanches, it is possible to find the most similar avalanche paths by computer methods. A procedure used in avalanche hazard forecasting, called the "nearest neighbour" method, is adopted to find the most equal avalanche paths. (Buser, 1983, Bakkehoi and Norem, 1993). The avalanche path is described with a set of parameters: total height difference H , the 10° point angle β , the angle in the starting zone Θ , y ", H_y ", $SD2$ and $QDIF$. $SD2$ is the variance for the theoretical parabola fitted to the profile by the root square minimum method based on the coordinates for the profile. $QDIF$ is describing the difference between the real profile and the theoretical parabola. The parameters are weighted with a coefficient k_i . The n -dimensional distance, r , is then calculated. By this method, avalanches with very similar longitudinal profiles and geometry are compared which makes it possible to perform a more accurate runout prediction. For all the avalanches, a standard set of coefficients gave a result with $S = 1,6^\circ$ and $R = 0,92$ based on the five most equal avalanches.

CALCULATION OF AVALANCHE RUNOUT DISTANCE BY DYNAMICAL MODELS

Two different dynamical models are tested on all of the avalanches; the PCM- model, and the NIS-model. The PCM- model (Perla et al. 1980) contains two friction-parameters, M/D and μ . The M/D value is a mass/drag parameter, proportional to the square of the avalanche velocity, and μ is the dry friction parameter. By scaling M/D to the total vertical fall of the avalanche (H), different values of M/D in the range $0,5H < (M/D) < H$ are tested out, in combination with $0.15 < \mu < 0.35$. The best fitted pairs were $M/D = 0.8H$, and $\mu = 0.25$, which gave $R = 0.91$, and $S = 2.30^\circ$. This is a better result than for the Norwegian avalanches, and in this respect in accordance with the results from the calculation by the topographical model.

The second dynamic model which has been applied is the NIS-model, developed by NGI (Norem et al., 1987). This is a two dimensional dynamic model where the avalanche is treated as a granular continuum with visco- plastic behaviour. In contrast to the PCM-model, the NIS model take into account : avalanche flow height, length of the avalanche, and physical characteristics of the avalanche.

The model contains the following parameters:

- dry friction coefficient 0.31
- shear viscosity 0.0005 m^2
- slab height (slope angle $\theta = 40^\circ$) 1.3 m
- slab length, L , depending on total vertical drop: $L = H/20 \cdot \cos \theta$

The slab height is selected as a function of the slope angle in the starting zone, according to the principles discussed by Föhn (1981).

The best fitted values for the NIS-model compared to all the observed avalanches gave $R = 0.85$, $S = 2,62^\circ$, a result very similar to the PCM-model.

CALCULATION ACCORDING TO THE VOELLMY-SALM -GUBLER MODEL

In the Voellmy-Salm-Gubler model (VSG) (Salm et al., 1990, Gubler, 1993), the following parameters are:

- fracture depth
- width, length and inclination of the starting zone
- kinetic friction coefficient
- turbulent friction coefficient
- flow rate
- cross section and slope angle in the track and runout zone

As an illustration, the runout distance of 5 of the avalanches in this study have been calculated according to the VSG-method, and compared to the observed runout lengths. The values of the parameters have been chosen by careful field inspection of the avalanche paths, and according to the experience of the local Avalanche and Torrent Control Section. The results of the calculations are presented in table 1.

For all the models, differences exist between observed and calculated runout distances. These differences are easily altered by slight changes of the parameter values. This was shown by Föhn and Meister (1982), as 10% error in determining the starting width and snow slab height, may cause 100 m longer or shorter runout distance for an avalanche with a vertical displacement of 1000 m for the VSG model.

Table 1 indicates that the calculated horizontal lengths for all the models differ from the maximum observed. For the topographic-, PCM- and NIS-model, all the avalanches have been tested towards the observed runout. It is therefore possible to show the real differences for each of the 80 avalanches. For the VSG-model, a test on all the avalanches has not been performed. Due to the procedure of runout calculation by this model, where the starting zone, track and runout are assigned specific figures for each avalanche, a statistical test including all 80 avalanches is beyond the scope of this work.

Table 1 Runout distances for 5 avalanches calculated by different models

Avalanche No.	Total horizontal length (m)				
	Observed	Calculated			
		Topographic model	PCM model	NIS model	VSG model
19	1767	1810	1813	1706	1716
21	1740	1889	1982	1827	1895
28	1519	1643	1780	1625	1816
30	3256	3097	2734	2734	3120
33	2138	2293	2345	2278	2380
Mean	2084	2146	2131	2034	2185
Mean diff. to observed	0	62	47	-50	101

CONCLUDING REMARKS

Delimitation of hazard zoning still depends on the experience of the avalanche expert, of historical records and statements of the local inhabitants, and the use of runout calculations. The application of several models is a better basis for the evaluation of runout distances than only one model. The authors are convinced that the use of a topographical/ statistical model in combination with a dynamic model, probably will be the best way of handling the runout calculation problem for snow avalanches.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is supported by the Austrian Avalanche and Torrent Control and the Norwegian Research Council through the EU-programme Human Capital and Mobility. The authors wish to express their gratitude for the support, which made this study possible.

LITERATURE:

- Bakkehøi, S., Domaas, U. and Lied, K. (1983)
Calculation of snow avalanche runout distance, *Annals of Glaciology* 4, pp. 24-29.
- Bakkehøi, S. and Norem, H. (1993)
Comparing topographical and dynamical runout models by ideas of "Nearest Neighbour Method". Paper presented at the 2nd Avalanche Dynamic Workshop in Innsbruck, 1993.
- Föhn, P. and Meister, R. (1982)
Determination of avalanche magnitude and frequency by direct observations and/ or with the aid of indirect snowcover data. IUFRO/FAO collegium on research on small torrential watersheds (incl. avalanches), June 1981, Grenoble, France.
- Klenkhart, C. and Weiler, C. (1994)
Lawinentechnische Aufnahmen in den Bundesländern Vorarlberg, Tirol, Kärnten und Salzburg. Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol, Innsbruck, 1994.
- Lied, K. and Bakkehøi, S. (1980)
Empirical calculations of snow avalanche runout distance based on topographic parameters, *Journal of Glaciology*, Vol. 26, No. 94, pp.165-177.
- Lied, K. Weiler, C., Bakkehøi, S., Hopf, J., (1995)
Calculation methods for avalanche runout distance for the Austrian Alps. Project report NGI 581210-3
- McClung, D.M., Mears, A. and Schaerer, P. (1989)
Extreme avalanche runout. Data from four mountain ranges. *Annals of Glaciology*, 13, 1989. *Int. Glac. Soc.*
- Norem, H., Irgens, F. and Schieldrop, B. (1987)
A continuum model for calculating snow avalanche velocities. *Proceedings of Avalanche Formation, Movement and Effects*. Davos 1986. IAHS Publ. 162.
- Perla, R., Cheng, T. and McClung, D.M. (1980)
A two-parameter model of snow avalanche motion. *Journal of Glaciology*, 26. (1994).
- Salm, B., Burkhard, A. and Gubler, H.U. (1990)
Berechnung von Fließlawinen, Eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen, *Mitteilungen des EISLF*, No. 47, July 1990.

Détection sismique des avalanches : conception et validation d'un système pré-opérationnel

B. Leprettre, J.-P. Navarre, Y. Danielou,
J.-M. Panel, A. Taillefer¹

RESUME

Depuis quelques années le Centre d'Etudes de la Neige de Grenoble (CEN) a mis en place un programme de détection sismique des avalanches (DSA). Dans un cadre opérationnel la DSA est susceptible de fournir en temps réel une estimation de l'activité avalancheuse au sein d'un massif à partir d'enregistrements sismiques à trois composantes. Un système d'analyse-expertise à logique floue a été conçu afin de discriminer les signaux d'avalanches des autres types de signaux. A travers quelques résultats obtenus lors de l'hiver 94-95 nous montrons l'intérêt de la DSA pour des applications opérationnelles concrètes.

ABSTRACT

For a few years the Centre d'Etudes de la Neige (Snow Research Center) in Grenoble has been studying the feasibility of the seismic detection of avalanches (SDA). The SDA is aiming to produce a real-time estimation of the avalanche activity of a massif from three-component seismic signals. An analysis and decision system, using fuzzy logic, has been built in order to discriminate avalanche signals from other types of signals. A few experimental results for winter 94-95 are presented. They show the interest of the SDA for operational applications.

INTRODUCTION

A l'heure actuelle l'estimation de l'activité avalancheuse d'un massif se fait à l'aide d'observations visuelles réalisées notamment par les stations de skis. L'inconvénient de l'observation humaine à ce niveau est qu'elle est dépendante des conditions météorologiques, qui peuvent rendre impossible l'observation en direct des avalanches. Seuls les dépôts d'avalanches peuvent éventuellement être observés après une période de mauvais temps. L'estimation de l'activité avalancheuse d'un massif est donc actuellement faussée. La détection sismique des avalanches (D.S.A) est susceptible de remédier à ce problème en fournissant une estimation en léger différé de l'activité avalancheuse d'une portion de massif. Une telle information pourrait permettre de mieux valider les modèles de prévision du risque d'avalanche (chaîne Safran-Crocus-Mepra), d'aider les nivologues dans leur prévision à court terme, et de surveiller en direct et en temps réel les zones exposées : routes de montagnes, villages, pistes de ski.

Après avoir exposé le principe de la D.S.A. et le déroulement des campagnes d'enregistrement, nous présentons le système d'analyse-expertise du signal que nous avons développé dans le but de reconnaître parmi tous les signaux enregistrés ceux qui ont été produits par des avalanches. Quelques résultats obtenus au cours de l'hiver 1995 sont ensuite présentés. Ils mettent en évidence l'intérêt de la D.S.A. pour des applications opérationnelles liées à la surveillance de zones à risque ou à la prévision à court terme du risque d'avalanche.

¹ Centre d'Etude de la Neige, Météo-France, 1441 Rue de la Piscine, F-38400 St-Martin-d'Hères
Tel : (33) 76-63-79-26 Fax : (33) 76-51-53-46 E-mail : Benoit.Leprettre@meteo.fr

PRINCIPE ET HISTORIQUE DE LA D.S.A.

Lorsqu'une avalanche se produit elle génère dans le sol des ondes sismiques qui peuvent être captées par un sismomètre couplé à une balise sismologique. La détection sismique des avalanches vise à estimer l'activité avalancheuse d'un massif en observant son activité sismique. Les premiers essais ont eu lieu à La Plagne (Savoie) en 1984, puis au Rivier d'Allemont (Isère). Depuis 1992 deux sites expérimentaux sont équipés : Saint-Christophe-en-Oisans et le refuge de la Lavey (Isère).

La DSA implique trois axes de développement : instrumentation, réalisation de campagnes de mesures et d'identification des événements, traitement des signaux obtenus. Ces trois aspects vont être développés à travers les résultats obtenus au cours des deux derniers hivers.

INSTRUMENTATION

Les deux sites actuellement équipés comportent le même matériel de base : un capteur sismique trois composantes, une balise sismologique permettant la détection et le stockage sur disque dur des événements, et un système de communication par modem avec le CEN. La fréquence d'échantillonnage utilisée est 100Hz. Les deux sites diffèrent cependant par l'instrumentation secondaire et la topographie du terrain environnant. Le site de la Lavey est situé au fond d'un vallon orienté Nord-Sud et dominé par de larges pentes avalancheuses. L'installation utilise les panneaux solaires et le radiotéléphone du refuge. Le site de Saint-Christophe est quant à lui sur le flanc d'une pente d'herbe et débris orientée au Sud-Ouest. L'instrumentation secondaire est plus complète qu'à la Lavey du fait de la facilité d'accès du site (route de la Bérarde déneigée tout l'hiver) et de la proximité du courant secteur et du téléphone. Une mini-station météorologique Campbell enregistre la température et la vitesse du vent. Un micro-ordinateur de type PC, accessible depuis le CEN via un modem, gère la station Campbell et la balise sismologique. Depuis 95 il effectue le traitement local des signaux. Par ailleurs, autour du site de Saint-Christophe, quatre couloirs d'avalanches bien connus ont été équipés de détecteurs-dateurs d'avalanches permettant de connaître avec précision la date et l'heure d'occurrence de ces avalanches. Du fait de la proximité de la route nous avons été confrontés sur ce site à des signaux parasites générés par des chasse-neige et qui peuvent être à tort interprétés comme des signaux d'avalanches.

Déroulement des campagnes de mesures

Les deux sites fonctionnent en permanence du mois de décembre au mois de mai depuis trois ans. Le seul enregistrement de l'activité sismique ne suffit pas à produire une estimation fiable de l'activité avalancheuse car de nombreux signaux sont captés en plus des avalanches : séismes, tirs de mines, passages d'hélicoptères, de véhicules ou d'animaux,... Il est donc nécessaire d'analyser chaque signal afin de déterminer s'il a été produit ou non par une avalanche. Les campagnes hivernales ont donc un double but : acquérir des signaux et déterminer leur origine à l'aide d'informations extérieures. Les avalanches sont identifiées d'une part grâce aux témoignages de résidents, d'alpinistes, ou de personnels de Météo-France en mission d'observation, et d'autre part à l'aide des détecteurs-dateurs de couloirs pour le site de Saint-Christophe.

IDENTIFICATION AUTOMATIQUE DES SIGNAUX D'AVALANCHES

Grâce à cette méthodologie nous disposons maintenant d'une importante collection de signaux trois composantes d'origine connue. Les avalanches ne représentent qu'environ 5% de l'ensemble des signaux enregistrés à St Christophe. Nous avons donc cherché un moyen de reconnaître automatiquement les signaux produits par des avalanches. Pour cela chaque signal a fait l'objet d'une étude détaillée impliquant trois domaines : analyse de l'enveloppe temporelle, analyse temps-fréquence, et analyse des polarisations linéaires. Une étude méthodologique nous a conduit à sélectionner la méthode ARCAP (Basseville et al., 1992)

pour l'analyse temps-fréquence. L'analyse des polarisations linéaires est réalisée en calculant un critère de linéarité (Glangeaud, 1981) sur une fenêtre de signal filtrée selon la méthode de Capon. Cette étape d'analyse du signal fait l'objet d'une convention entre le CEN et le CEPHAG (Centre d'Etude des Phénomènes Aléatoires et Géophysiques de Grenoble). En ce qui concerne l'analyse de l'enveloppe temporelle deux méthodes originales ont été développées : paramétrisation de l'histogramme cumulé des pics d'amplitude de l'enveloppe temporelle lissée et modélisation de l'enveloppe lissée par une forme idéalisée d'enveloppe de séisme.

Malgré cette étude complète il s'est révélé difficile de trouver des critères fiables permettant une reconnaissance directe des avalanches. En revanche nous avons établi une série de critères et de règles de discrimination permettant de reconnaître la grande majorité des signaux d'origine non-avalancheuse. Nous avons donc construit un système d'analyse-expertise permettant de les éliminer à partir de l'évaluation d'une quinzaine de critères pertinents. Il est rapidement apparu que les signaux n'avaient que rarement des caractéristiques suffisamment nettes pour permettre une reconnaissance sans ambiguïté possible. Par conséquent nous avons introduit la logique floue dans le processus d'expertise à deux niveaux : la valeur de vérité de chaque critère est estimée à partir d'ensemble flous (Zadeh, 1965), et chaque règle de décision est associée à un facteur de crédibilité (Shortliffe, 1975) qui représente sa fiabilité. Le résultat final de l'analyse d'un signal est donc le degré d'appartenance (entre 0 et 100%) du signal à chaque classe de signaux non-avalancheux connue. Ceci permet d'estimer la fiabilité du diagnostic fourni et le cas échéant de signaler un litige entre plusieurs conclusions possibles. Pour plus de précisions on pourra se référer à (Haton et al., 1991), (Fieschi, 1984), (Descamps, 1985).

Le système dans sa version actuelle (Leprettre, soumis) se compose donc d'un module d'analyse du signal trois composantes, d'un module d'estimation de critères à l'aide d'ensembles flous, et d'un module d'expertise de ces critères selon une base de règles floues séparée et facilement modifiable. Le taux global de reclassement correct en deux catégories - avalanche (AV) et non-avalanche (NAV) - est d'environ 90% sur un ensemble de 250 signaux tests d'origine connue. Une analyse plus fine fait apparaître un reclassement correct des signaux effectivement avalancheux dans la catégorie AV supérieur à 90%. Les bruits d'hélicoptères, les tirs de mine, les téléseismes sont bien classés en catégorie NAV avec un taux très légèrement inférieur à 100%. Par contre nous avons encore quelques difficultés à discriminer certains séismes régionaux très perturbés : environ 20% d'entre eux sont à tort classés en avalanche.

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Le système d'analyse-expertise décrit plus haut fonctionne à titre expérimental sur le micro-ordinateur PC du site de Saint-Christophe depuis le 5 janvier 95. Les signaux enregistrés sont analysés et identifiés automatiquement par pas de 24 heures. Les résultats sont consultés chaque jour depuis le CEN : heure des signaux enregistrés et des signaux identifiés comme avalanche. Ce système nous a permis de suivre durant toute la saison 95 l'évolution dans le temps de l'activité sismique avalancheuse. A titre d'exemple la figure 1 représente le nombre total de signaux enregistrés (haut) chaque jour du 5 au 31 janvier 1995 sur le seul site de Saint-Christophe, le nombre de signaux classés en avalanche par notre système, ainsi qu'un certain nombre de données comparatives (bas). Elles permettent d'observer la cohérence des informations fournies par notre système dans un cadre opérationnel avec les autres informations dont nous disposons.

Cette figure montre bien que les pics d'activité sismique totale ne correspondent pas toujours à des pics d'activité sismique avalancheuse (9 janvier par exemple), et que la discrimination des signaux, telle qu'on la réalise avec notre système, est nécessaire. Les périodes pendant lesquelles un grand nombre de signaux d'avalanches est détecté correspondent effectivement à des conditions nivo-météorologiques avalancheuses marquées, comme le montre l'évolution des indices de risque et nous l'ont confirmé des observations et informations ultérieures.

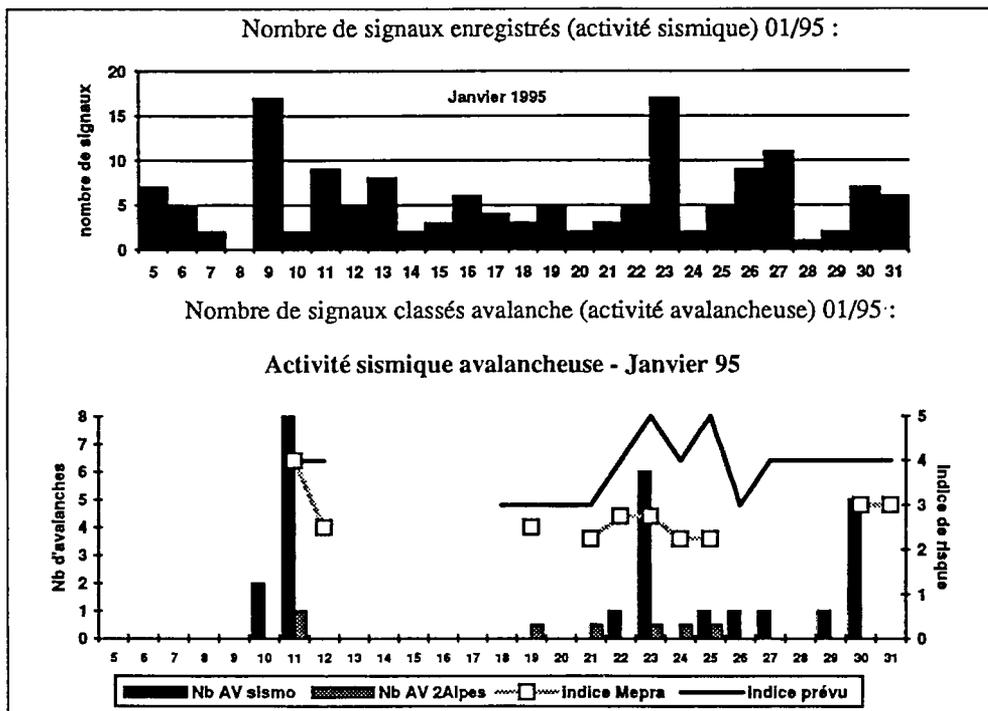


Figure 1 - Haut : Activité sismique journalière totale à St-Christophe en janvier 95 - Bas : Activité avalancheuse journalière déduite par le système SISMO, observations du réseau nivométéorologique (station des Deux-Alpes), indice de risque d'avalanche naturelle (sur la nouvelle échelle européenne de risque d'avalanche) prévu par la station de St-Martin-d'Hères lorsqu'il est supérieur à 2 (risque faible) et indice donné par le système expert MEPRa pour le massif des Ecrins, exposition Sud-Ouest.

L'activité avalancheuse fournie par les postes de l'Oisans du réseau nivo-météorologique apparaît bien inférieure à celle donnée par la DSA. En effet quelque soit l'activité sismique avalancheuse ou l'indice de risque le nombre d'avalanches signalées par les observateurs dépasse rarement deux avalanches ou coulées par jour. La DSA semble en revanche être en mesure de fournir un renseignement quantitatif sur l'importance de la crue avalancheuse, le nombre de signaux d'avalanches détectés en une journée pouvant être très variable (de 0 à 7 dans le cas présent). L'indice de risque estimé d'après les prévisions de la chaîne Safran-Crocus-Mepra (Giraud et al., 1994) et les résultats de la DSA apparaissent en bonne corrélation. L'indice de risque d'avalanche naturelle prévu par la station de Saint-Martin-d'Hères présente des évolutions similaires à l'exception de l'épisode du 30 janvier.

A une échelle plus réduite l'épisode avalancheux du 11 janvier 1995 est détaillé sur la figure 2. Le nombre d'avalanches détectées par notre système du 10/01/95 au 12/01/95 y est porté avec un pas d'une heure. Le paramètre HTN désigne la Hauteur Totale de Neige relevée par la balise automatique Nivose des Ecrins située à dix kilomètres de Saint-Christophe à une altitude d'environ 3000m, ce qui correspond à peu près à l'altitude des combes et couloirs susceptibles de partir en avalanche sur le site de Saint-Christophe. L'exposition des deux sites est voisine.

On remarque qu'une activité avalancheuse marquée (huit avalanches détectées dans la nuit du 10 au 11 janvier 95) débute pendant la phase de précipitations dès lors que le cumul des chutes de neige atteint une quarantaine de centimètres. La journée qui suit est marquée par une poursuite de l'activité avalancheuse (purge). Ceci peut s'expliquer par le fait que l'ensemble de cette période a été marquée par un fort vent de secteur Nord / Nord-Ouest favorisant le transport de la neige fraîche vers les combes situées au dessus du site et orientées globalement au Sud. Notons que le temps est resté couvert pendant la totalité de cet épisode et qu'une observation visuelle n'aurait donc pas été en mesure d'estimer aussi précisément l'évolution de l'activité avalancheuse. S'agissant d'avalanches de neige récente poudreuse, l'estimation des dépôts aurait également été difficile.

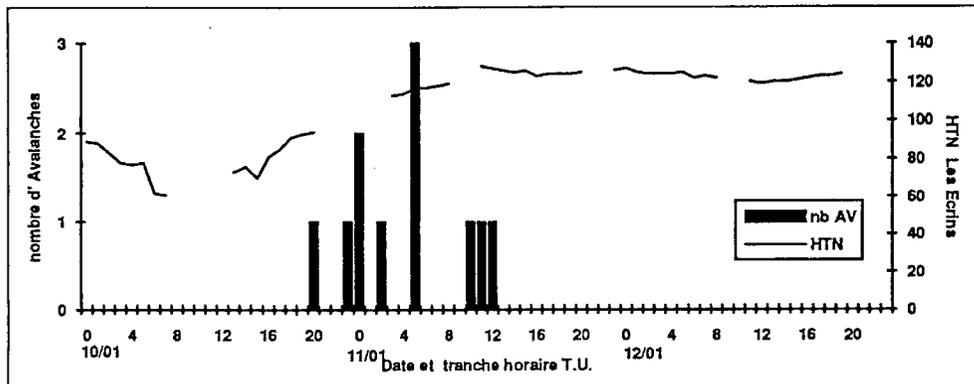


Figure 2 - Répartition dans le temps des avalanches détectées du 10 au 12 janvier 95 et hauteur totale de neige (HTN) donnée par la balise NIVOSE des Ecrins.

Les résultats obtenus cette année montrent que l'estimation de l'activité avalancheuse par méthode sismique semble fournir des résultats cohérents avec les éléments nivométéorologiques dont nous disposons. Dans une optique opérationnelle, l'analyse des signaux avec un pas de temps réduit peut apporter une information fiable sur l'importance d'un épisode avalancheux mais aussi de repérer son début et la fin de la crue avalancheuse.

CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article une méthode d'estimation en temps quasi réel de l'activité avalancheuse basée sur la détection sismique et la reconnaissance des avalanches. Se pose tout naturellement la question de la portée du système. Il est difficile de donner une réponse globale. En effet l'amplitude et la qualité du signal dépendent à la fois de la masse de neige en mouvement, de la nature de l'écoulement, de la configuration du terrain, et de la distance entre l'avalanche et le capteur sismique. Disons seulement que de grosses avalanches dynamiques ont été captées jusqu'à une dizaine de kilomètres du site (avalanche des Fréaux en 1994, avalanche du Râteau en 1992). Par contre des coulées observées à proximité du site, mais de faible amplitude ou d'écoulement lent et régulier (type avalanche de printemps) n'ont pas été détectées, ou bien ont produit des signaux avec un rapport signal sur bruit si faible que l'analyse s'en est révélée impossible. Dans un cadre opérationnel il conviendra donc de choisir un site d'installation représentatif du massif à surveiller en terme d'altitude, de pente, et d'exposition tout en évitant les zones sismiquement agitées (torrents, sites ventés,...). Les résultats encourageants de cette première saison en fonctionnement pré-opérationnel nous conduisent à envisager à courte échéance la réalisation d'un prototype opérationnel autonome. Les problèmes de stockage, d'analyse-expertise *in situ* et surtout de communication par satellite avec le CEN sont à l'étude. Une première version opérationnelle pourrait voir le jour

au cours de l'hiver prochain. Par ailleurs des recherches sont en cours pour déterminer si l'analyse des ondes linéaires du signal permet d'estimer de manière fiable la direction d'arrivée du signal. Si tel est le cas, notre système pourrait être en mesure non seulement de détecter et de reconnaître les avalanches, mais aussi de les localiser.

BIBLIOGRAPHIE

Basseville (M.), N. Martin, and P. Flandrin. (editors), 1992. Méthodes temps-fréquence et segmentation de signaux. *Traitement du signal*, Suppl. Vol. 9, n°1.

Descamps (R.), 1985 - *Apple, logique et systèmes experts*. PSI Micro et techniques, 213 p.

Fieschi (M.), 1984 - *Intelligence artificielle en médecine-des systèmes experts*. Masson, 204p.

Giraud (G.), E. Brun, Y. Durand, E. Martin, 1994 - Validation of objective models to simulate snow cover stratigraphy and avalanche risks. ISSW oct. 94, Snowbird, Utah, U.S.A.

Glangeaud (F.), 1981 - Signal processing for magnetic pulsations. *J. of Atm. and Terr. Physics*, Vol.43, n°9, 981-998.

Haton (J.P.) et al., 1991 - *Le raisonnement en intelligence artificielle - Modèles, techniques et architectures pour les systèmes à bases de connaissances*. Paris, InterEditions, 480 p.

Leprettre (B.), N. Martin, F. Glangeaud. (soumis) - Three-component signal characterization in the time, time-frequency, and polarization domains using the ARCAP method. Application to Seismic Detection of Avalanches. *IEEE transcriptions in Signal Processing*.

Leprettre (B.), J.P. Navarre, N. Martin (soumis) - Avalanche detection and automatic recognition using ARCAP time-frequency analysis of three-component seismic signals and fuzzy logic. Communication à UIGG XXI General Assembly, Boulder, Colorado, U.S.A., Juillet 1995.

Shortliffe (E.H.), B.G. Buchanan, 1975 - A model of inexact reasoning in Medecine. *Math. Bioscience* 23, 351-379.

Zadeh (L.A.), 1965 - Fuzzy sets. *Information and Control* 8, 338-353.

Utilisation des techniques d'imagerie pour la cartographie des vitesses à la surface d'une avalanche de neige dense

F. Granada¹, P. Villemain¹, O. Marco²

RESUME

La recherche sur la dynamique des avalanches de neige dense a produit de nombreux modèles numériques. La difficulté de mesurer les paramètres fournis par ces modèles a empêché leur validation par comparaison avec des phénomènes réels. Le traitement d'images est une première approche de cette validation. Depuis une quinzaine d'années, la stéréophotogrammétrie à cadence rapide a été utilisée par la division Nivologie du Cemagref pour déterminer la morphologie tridimensionnelle d'un écoulement. Nous nous proposons d'utiliser le traitement d'images vidéo des avalanches de neige dense pour mesurer le champ des vitesses à la surface des écoulements. La difficulté du traitement est due à l'indétermination des formes et à un "flou de bougé" qui apparaît pour les vitesses élevées. Nous montrons que différentes techniques utilisant l'intercorrélation des images permet d'obtenir une bonne estimation de la distribution des vitesses.

ABSTRACT

The study of the dynamic of dense snow avalanches has produced many numerical models. The difficulty of the parameters measurements provided by these models have prevented their validation by comparison with the real phenomenons. Image processing is a first approach for these validations. The stereophotogrammetry at fast cadence has been used for 15 years by Cemagref Nivologie Division for determination of the tridimensionel flow morphology. We propose to use image video processing for avalanches in order to reach the measures of flow surface velocity. The difficulty of the treatment comes from the lack of shape definition of the objects and to the blurring due to the high velocity of the motion. We show that different techniques using image cross-correlation allows a good evaluation of speed distribution.

INTRODUCTION

L'étude de la dynamique des avalanches a donné lieu à de nombreux modèles théoriques et à quelques expérimentations de validation sur des sites avalancheux. Nous proposons, dans cet article, une méthode d'analyse des films vidéo d'avalanches de neige dense avec pour objectif de réaliser une cartographie des vitesses à la surface de l'écoulement et de comparer ces résultats à ceux des modèles numériques. Les conditions des prises de vues sont très mal maîtrisées en raison du danger que représente l'avalanche pour l'opérateur. Le matériel de prise de vues est standard, car il ne peut être question d'utiliser des caméras à haute résolution ou à grande vitesse qui, par leur poids et leur sensibilité à la température, sont inadaptées. Les traitements doivent pouvoir donner des résultats sur des images extraites des documents vidéo ou films, obtenus par un

¹ Laboratoire d'Instrumentation de Micro-informatique et d'Electronique. LIME-U.J.F.G. B.P. 53 X, 38041-Grenoble Cedex (France). Tél: (33) 76 51 43 65 - Fax: (33) 76 51 42 53

² Division Nivologie du Cemagref, 2 rue de la Papeterie, B.P. 76, 38402-Saint-Martin-d'Hères Cedex. Tél: (33) 76 76 27 93 - Fax: (33) 76 51 38 03

matériel standard. Dans ces conditions, les images obtenues présentent deux difficultés pour leur traitement : la fréquence de 25 images/s conduit à un "flou de bougé" dû au temps de pose et, d'autre part, les formes et contrastes des images sont mal définis et instables au cours du temps. Cependant, des études ont été conduites avec succès sur des phénomènes semblables en météorologie ou en aérodynamique. L'analyse par autocorrélation et intercorrélation fournit des résultats corrects. L'approche que nous présentons ici utilise une méthode de filtrage et a permis d'obtenir la répartition des vitesses en tout point de la surface de l'écoulement. Les résultats obtenus sont bidimensionnels car nous avons exclu de cette étude le problème de l'étalonnage tridimensionnel des images qui sera traité ultérieurement.

METHODE ADAPTATIVE.

Analyse du problème.

La technique que nous développons utilise le fait que chaque image vidéo est constituée par deux trames acquises à des instants séparés de $1/50$ s. Ceci nous permet de doubler la résolution temporelle de notre échantillonnage. D'autre part le "flou de bougé", dû au temps de pose, produit dans toute méthode d'intercorrélation une contribution importante dans le pic central. Ceci a pour effet de masquer le pic d'intercorrélation dû au déplacement. Pour remédier à cet inconvénient, nous avons simplement travaillé par soustraction de trames. Si l'on soustrait les trames paires et les trames impaires de deux images consécutives, nous obtenons deux images dont les niveaux de gris caractérisent les zones de la surface qui ont subi un déplacement. Nous n'avons ainsi retenu dans chaque image que les informations relatives aux déplacements (figure 1). Il faut alors estimer la translation qui fait passer de la différence des trames paires à la différence des trames impaires. Nous utilisons pour cette estimation un filtre adaptatif de Wiener, déjà largement décrit dans de nombreux articles.



Figure 1. Soustraction de deux trames d'une même image.

Modélisation.

On désigne par $J(x,y,t)$ l'intensité lumineuse de l'image initiale présentant le "flou de bougé" où x,y sont les coordonnées d'un pixel de l'image et t l'instant de son acquisition. On désigne par $I(x,y,t)$ l'intensité lumineuse instantanée de l'image nette, ces deux intensités sont liées par la relation:

$$\mathbf{u}(x,y) \text{ Grad}(J(x,y,t))=I(x,y,0)-I(x-a,y-b,0)$$

où :

$\mathbf{u}(x,y)$ est la vitesse de déplacement du point de coordonnées x,y supposée constante pendant la saisie de l'image.

a et b sont les coordonnées du vecteur de déplacement correspondant à la vitesse \mathbf{u} pendant le temps de pose.

On s'intéresse dans une première étape à la vitesse moyenne \mathbf{v} du déplacement des pixels de l'image pendant le temps de pose. En transformée de Fourier, cette relation devient :

$$2i\pi\mathbf{q}\mathbf{v}J(\mathbf{q},t) = \text{Sin}(2\pi\mathbf{q}\mathbf{a})I(\mathbf{q},t)$$

Où \mathbf{q} est un vecteur des fréquences spatiales. On désigne maintenant par \mathbf{A} le déplacement moyen entre deux trames consécutives. Soient I_0, I_1, I_2, I_3 , les intensités de quatre trames successives séparées de $1/50$ s on peut alors écrire trois relations entre les Transformées de Fourier de ces trames du type :

$$I_1(\mathbf{q}) = e^{-2i\pi\mathbf{q}\mathbf{A}}I_0(\mathbf{q})$$

En notant J_0, J_1, J_2, J_3 , les intensités des images non traitées nous obtenons les relations :

$$J_3(\mathbf{q}) - J_1(\mathbf{q}) = e^{-2i\pi\mathbf{q}\mathbf{A}}(J_2(\mathbf{q}) - J_0(\mathbf{q}))$$

$$J_3(\mathbf{q}) - J_2(\mathbf{q}) = e^{-4i\pi\mathbf{q}\mathbf{A}}(J_1(\mathbf{q}) - J_0(\mathbf{q}))$$

Nous constatons que ces relations ne contiennent plus de termes dûs au "flou de bougé". On est donc ramené à estimer les fonctions de transfert entre les différences de deux couples de trames.

L'expression de cette estimation est :

$$H(\mathbf{q}) = \frac{X(\mathbf{q})Y^*(\mathbf{q})}{|X(\mathbf{q})|^2 + \beta^2(\mathbf{q})}$$

$X(\mathbf{q})$ et $Y(\mathbf{q})$ représentent les différences des trames paires et impaires. La densité spectrale du bruit $\beta^2(\mathbf{q})$ a été estimée comme la variance du spectre d'une séquence de 60 images d'une région immobile définie par le petit rectangle en haut à gauche de la figure 3. Pour diminuer l'influence du bruit, ce calcul a été réalisé sur un ensemble de sous-images de 64×64 pixels ce qui diminue la résolution du déplacement mais améliore sa détection. La transformée de Fourier inverse $h(x,y)$ de la moyenne des fonctions $H(\mathbf{q})$ présente alors un pic très prononcé à l'extrémité du vecteur déplacement \mathbf{A} .

Les valeurs des déplacements en fonction de la position dans l'image sont obtenus en recherchant dans chacune des sous-images le maximum de la fonction $h(x,y)$ au voisinage de l'extrémité du vecteur \mathbf{A} . On obtient ainsi une première approche de la cartographie des vitesses à la surface de l'écoulement.

Résultats obtenus.

Les films vidéo ont été pris par un caméscope CCD-V5000E (vidéo Hi8 PRO) de SONY utilisant le standard PAL. La digitalisation des images a été effectuée par une carte Media Magic. Le traitement numérique a été réalisé à l'aide du logiciel DxImage de société DDS sur un ordinateur HP 9000. Le synoptique de la méthode de traitement est indiqué dans la figure 2.

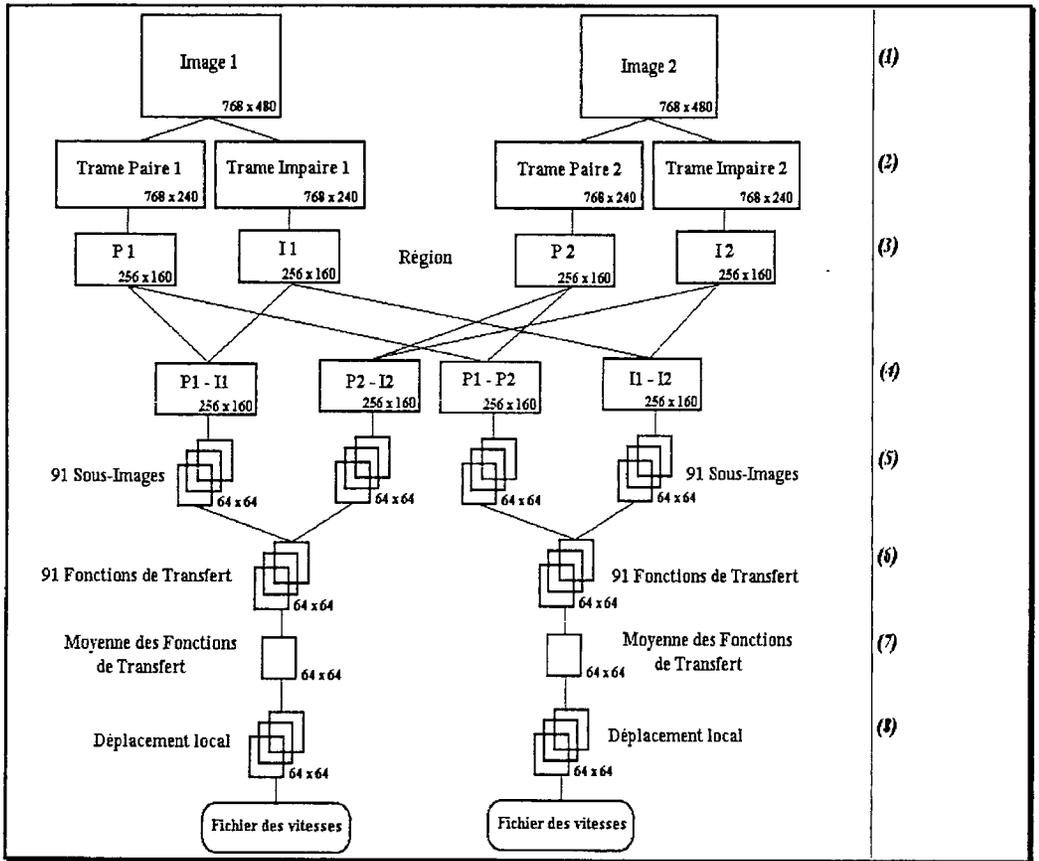


Figure 2. Synoptique de la méthode de traitement

Les différentes étapes du calcul sont les suivantes:

- (1) - On utilise deux images consécutives, Image 1 et Image 2; "un exemple d'image" est représentée sur la figure 3.
- (2) - On extrait les deux trames de chacune des images.
- (3) - On travaille dans une région définie par le rectangle (256x320), de la figure 3 à droite.
- (4) - On travaille sur les deux couples de différences:
 Trame Paire - Trame Impaire de l'image 1 : Trame Paire - Trame Impaire de l'image 2
 Le déplacement entre ces deux images est un vecteur 2A.
 T. Paire de l'image 1 - T. Impaire de l'image 2 : T. Impaire de l'image 1 - T. Impaire de l'image 2
 Le déplacement entre ces deux images est un vecteur A.
- (5) - On extrait de chaque différence 91 sous-images (64 x 64) décalées de 16 pixels dans chacune des deux directions.
- (6) - On réalise les 91 estimations des fonctions $h(x,y)$ sur chaque différence.
- (7) - On détermine la position du maximum qui fournit le déplacement moyen dans la région étudiée sur chacune des moyennes.
- (8) - On recherche dans chacune des 91 fonctions $h(x,y)$ un maximum significatif au voisinage du déplacement moyen. On obtient ainsi une estimation du déplacement en chacun des 91 points de la région.



Figure 3. Image floue d'une avalanche. A gauche, en bas, un support de capteurs profilé en aile d'avion, en haut, fenêtre déterminant la portion de surface utilisée par calculer la densité spectrale du bruit. A droite: fenêtre déterminant la portion de surface étudiée.

Ces déplacements sont représentés par des segments sur la figure 4.

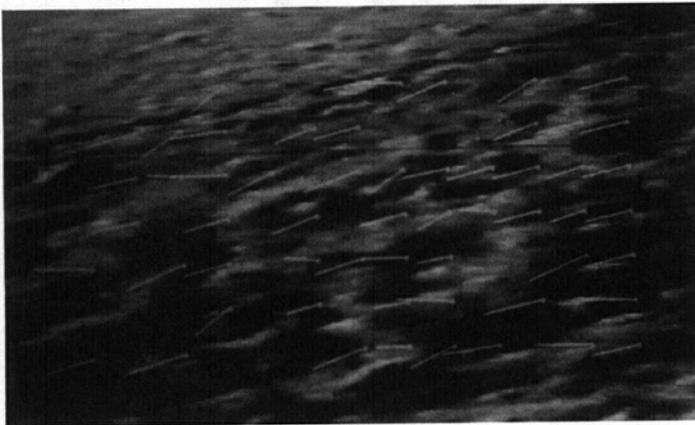


Figure 4. Déplacements du couple: Paire 1 - Paire 2; Impaire 1 - Impaire 2

Validation de ces résultats.

Les figures 5 et 6 représentent les moyennes des fonctions $h(x,y)$ obtenues dans chacun des deux traitements. On vérifie que le vecteur déplacement obtenu lorsque l'on travaille par différence de trames de deux images différentes, est $A(8,2)$. Le déplacement obtenu lorsque l'on travaille sur les différences des trames d'une même image est $A'(16,4)$. Ceci est conforme avec les hypothèses du modèle. Chaque fonction $h(x,y)$ présente, à quelques exceptions près, un maximum dans une zone de plus ou moins 5 pixels autour du maximum moyen. Cela signifie que l'écoulement observé est assez uniforme, les fluctuations des déplacements n'excédant pas 50% de la valeur moyenne. Pour illustrer les fluctuations de vitesses observées dans cette région de l'écoulement nous avons représenté sur la figure 7 le module de la vitesse (m/s) en fonction de la position (pixels).

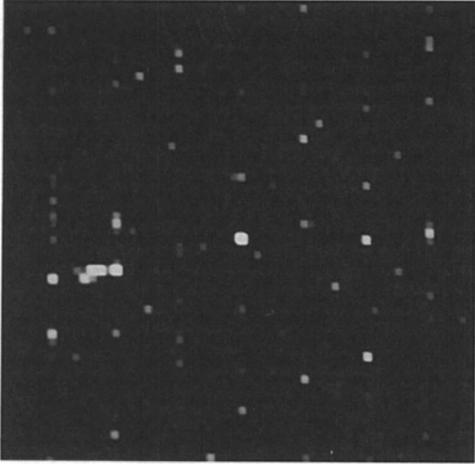


Figure 5.
Moyenne des Fonctions de Transfert des couples
Paire 1 - Impaire 1
Paire 2 - Impaire 2

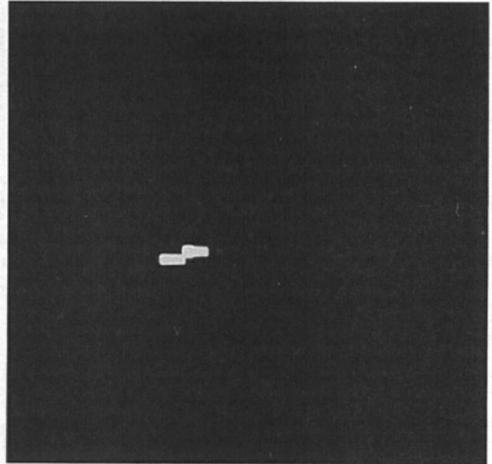


Figure 6.
Moyenne des Fonctions de Transfert des couples
Paire 1 - Paire 2
Impaire 1 - Impaire 2

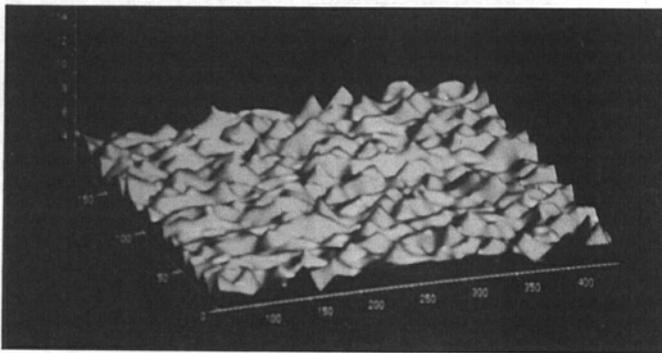


Figure 7. Vitesse (m/s) en fonction de la position (pixels). La position (0,0) correspond au coin inférieur gauche de la figure 4.

D'autre part, un étalonnage de l'image réalisé dans le plan du support des capteurs situé à gauche de l'image sur la figure 3, donne une distance de 85 pixels par mètre, ce qui conduit à un déplacement moyen de 20 cm pendant 1/25 s. La vitesse moyenne correspondante est donc de 5 m/s. Nous vérifions également sur la figure 4 que les déplacements mesurés décroissent en fonction de la distance à la caméra, ceci s'explique par la profondeur de champ utilisée et donc par la différence entre la vitesse apparente sur le plan image et la vitesse réelle dans l'espace objet.

CONCLUSION.

Ces premiers résultats prouvent qu'il est possible de mesurer par traitement d'images la distribution des vitesses à la surface d'un écoulement de neige dense en traitant numériquement des images obtenues dans des conditions standard de prise de vues. En l'état actuel de l'étude, une estimation correcte de la précision des résultats est encore difficile à fournir. Cependant ces traitements effectués sur un grand nombre de couples d'images ont toujours fourni des résultats cohérents. Plusieurs problèmes restent encore à traiter. L'étalonnage tridimensionnel des images utilisant des repères connus sur le terrain permettra une évaluation exacte de la vitesse. L'évolution des vitesses au cours du temps nécessite un traitement systématique d'une grande série d'images qui fournira l'ensemble des données que l'on comparera aux modèles numériques appliqués au même écoulement. Enfin l'étude de l'influence de la topographie du terrain sur la distribution des vitesses doit permettre une meilleure compréhension de la dynamique de l'écoulement.

Ce travail a été financé par le "Pôle Grenoblois d'Etudes et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels", par le contrat de Plan Etat-Région Rhône-Alpes, et par le programme européen "Capital Humain et Mobilité".

BIBLIOGRAPHIE.

- Nunez (J.) and Llacer (J.), 1993 - A general bayesian image reconstruction algorithm with entropy prior. Preliminary application to HST data, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 105, octobre, pp.1192-1208.
- Ward (R.K.), 1993 - Restoration of differently blurred versions of an image with measurement errors in the PSF's, *IEEE Transactions on image processing*, 2, juillet, pp.369-381.
- Biamond (J.), Lagendijk (R.L.) and Mersereau (R.M.), 1990 - Iterative methods for image deblurring, *Proceedings of the IEEE*, 78, mai, pp. 856-883.
- Biamond (J.), van der Putten (F.G.) and Woods (J.W.), 1988 - Identification and restoration of images with symmetric noncausal blurs, *IEEE Trans. Circ. Syst., CAS-35*, avril, pp. 385-393.

Modélisation des avalanches poudreuses : possibilités d'utilisation dans le cadre d'un zonage réglementaire des risques naturels

P. Bouvet¹, Y. Cassayre¹, C. Charlier²
O. Marco² M. Naaim²

RESUME

Le zonage des risques d'avalanche a été réalisé sur la commune des Houches en 1991, selon une méthodologie habituelle. Le 26.12.1993, un aérosol a provoqué quelques dégâts à des bâtiments situés en zone blanche (supposée sans risque). Pour la nécessaire révision du zonage et parce que les données recueillies le permettaient, il a été décidé d'utiliser les modèles de simulation d'avalanches développés au CEMAGREF Nivologie. Cette modélisation a été et ne reste qu'une aide pour l'expert responsable du zonage, pour mieux délimiter les zones exposées en extrapolant raisonnablement autour d'une avalanche de référence constatée.

ABSTRACT

An avalanche hazard map was established for the commune des Houches, in 1991. On december 26th, 1993, a powder snow avalanche caused damage to buildings in an area not considered prone to this risk. The revision of the map then proved necessary. Having had a certain amount of data on that particular event, it was decided to use it in an avalanche simulation model, developed by the CEMAGREF-Nivologie. Yet the resulting model, based on what is now considered as a reference avalanche, is only, and should only be considered as a helping tool for the expert in charge of the delimitation of exposed areas.

LA REALISATION PRATIQUE DES ZONAGES DE RISQUE OU LE ROLE PRIMORDIAL DES DONNEES HISTORIQUES ET DE L'EXPERT.

Depuis 1955, plusieurs textes font obligation à l'Etat Français de délimiter les zones exposées à des risques naturels (le dernier étant la loi du 2 février 1995 relative aux Plans de Prévention des Risques Naturels Prévisibles).

Pour les risques d'avalanches, les différentes cartes produites (PZEA, cartes d'aléas ou cartes de risques des procédures PER ou R 111-3) l'ont été selon la méthodologie habituelle ci-dessous :

- recensement des avalanches constatées par le passé dans chaque couloir,
- puis enquêtes complémentaires et tracé des différentes limites par un technicien compétent et expérimenté ("l'expert").

¹Service R.T.M. - 6, Avenue de France, 74000 Annecy

²CEMAGREF Nivologie - BP 76, 38402 St Martin d'Heres Cedex

Les données historiques sont, dans la plupart des cas, nombreuses grâce à l'Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA) qui recense depuis le début du siècle chaque avalanche significative sur environ 5 000 couloirs en France. Ces données, complétées par l'exploitation d'archives diverses et par enquête auprès des habitants, constituent la base essentielle de tout zonage des risques d'avalanches.

Des enquêtes complémentaires (examen détaillé des photos aériennes et étude approfondie du terrain, à l'exclusion de modélisations propres à chaque site) permettent ensuite la délimitation des zones exposées aux avalanches.

Cette délimitation est donc *"une estimation formulée par un technicien chargé de bon sens et d'expérience dans le domaine. Diverses expériences de simulations physiques ou mathématiques sont en cours pour corriger ces lacunes (de la méthodologie - Nda). Elles nécessitent d'être menées à terme. Certaines permettent déjà de cadrer ou de caler quelques appréciations empiriques, mais elles ne peuvent pas encore être employées de manière systématique"* [C. CHARLIER - 1982].

De cette méthodologie est issu le zonage du P.E.R. de 1991 de la Commune des HOUCHES (fig.1).

L'AVALANCHE DU 26 DECEMBRE 1993 : DES DEGATS EN ZONE BLANCHE

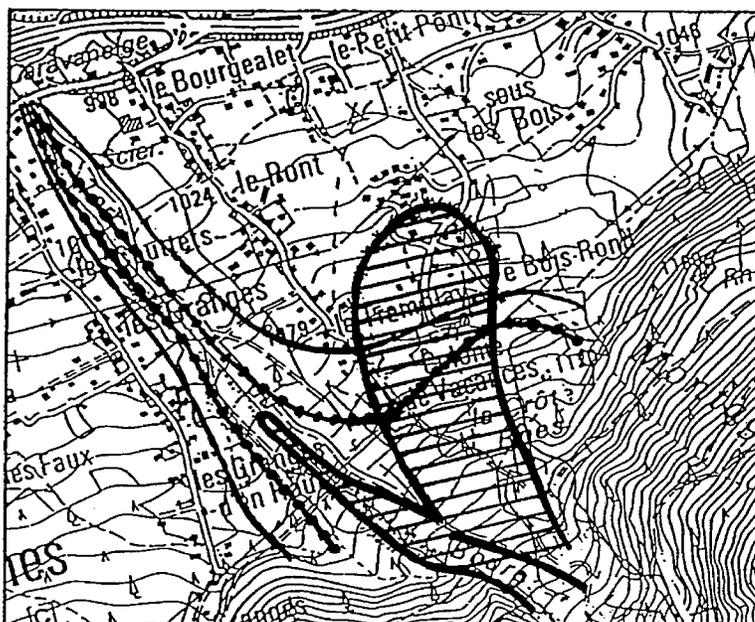


Figure 1

Avalanche du 26 décembre 1993

 Limite des dépôts de neige et des effets dommageables de l'aérosol

Zonage du Plan d'Exposition aux Risques

 Limite de zone rouge

 Limite de zone bleue

Après 2 jours de mauvais temps (1 m de neige fraîche à 1 500 m d'altitude et sans doute beaucoup plus à 3 000 m), l'avalanche s'est déclenchée vers 13 h. Le nuage poudreux a traversé toute la vallée de l'Arve, causant des dégâts à plusieurs bâtiments en partie amont du cône de déjection (un bâtiment en zone bleue, les autres en zone blanche - fig. 1). Ces dégâts, non dramatiques, auraient néanmoins justifié des prescriptions architecturales pour être évités.

Un écoulement de neige dense s'est également produit dans le même temps ; il est resté bien canalisé par le lit du torrent (et par une digue déflectrice en berge).

POUR EXPLOITER AU MIEUX LES DONNEES SUR L'AVALANCHE DE 1993 : LA MODELISATION NUMERIQUE DE L'AEROSOL.

Après cet événement et dans ce cas particulier, il est apparu que les outils de modélisation (en l'occurrence la modélisation numérique des aérosols) pouvaient être utilisés et apporter à l'expert des données complémentaires pour réviser le zonage [C. Charlier et O. Marco, 1995]. Le modèle utilisé a été le modèle numérique développé au CEMAGREF Nivologie où l'écoulement d'une avalanche poudreuse est considéré comme l'écoulement turbulent d'un fluide lourd (air + particules de neige) dans un fluide léger (air) [M. Naaim, 1995]. Ce modèle a été validé sur des mesures expérimentales (hauteur et vitesse du front) obtenues en canal noyé [P. Beghin et al., 1990].

Ceci a été possible grâce :

- ♦ aux données disponibles sur l'avalanche de 1993 :
- photos prises pendant l'écoulement (qui ont permis d'avoir une idée approximative de la hauteur de l'écoulement) ;
- enquête minutieuse sur les dégâts occasionnés (qui a permis de délimiter la zone ayant subi des dégâts significatifs et qui aurait donc justifié de prescriptions architecturales spécifiques).
- ♦ à des évaluations par l'expert, toujours discutables, des paramètres non mesurés (vitesse, largeur, densité, ...).

La délimitation par l'expert de la zone au-delà de laquelle il considère l'effet de l'aérosol comme négligeable est une phase essentielle pour le calage du modèle numérique (le modèle numérique devant reproduire une avalanche où la limite des pressions calculées supérieures à 100 da N/m² se superpose à cette délimitation de l'expert - fig.2).

Une fois calé, le modèle numérique a été utilisé pour extrapoler au-delà de l'avalanche constatée, pour que le nouveau zonage tienne compte de l'avalanche de 1993 et d'une marge de sécurité raisonnable (notamment parce que toute la neige accumulée dans les zones de départ n'était pas partie lors de l'événement de 1993). Dans le modèle, l'extrapolation a été faite en augmentant et en diminuant la masse de neige de 30 % (fig. 3 et 4).

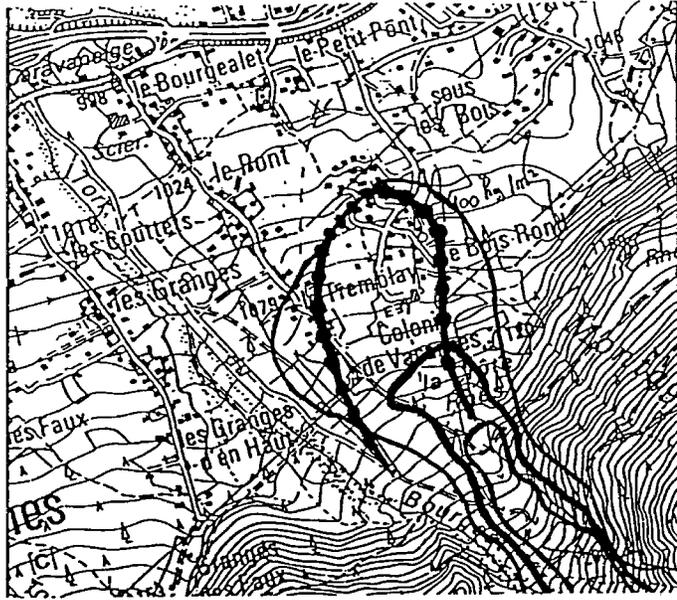


Figure 2
Modélisation de l'avalanche de référence

- | | |
|---|--|
| <p>Enquête de terrain
Avalanche de référence (26 décembre 1993)</p> <p> Limite de la zone au-delà de laquelle les dégâts sont négligeables</p> | <p>Modélisation</p> <p> Limite de pression supérieure à 100 daN/m²</p> <p> Limite de pression supérieure à 1000 daN/m²</p> <p> Limite de pression supérieure à 2000 daN/m²</p> |
|---|--|

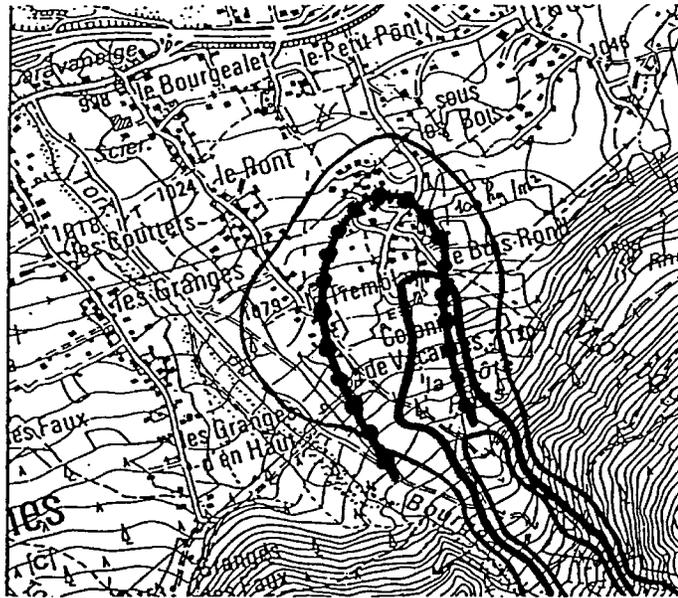


Figure 3
Modélisation de l'avalanche de référence augmentée de 30% de masse de neige

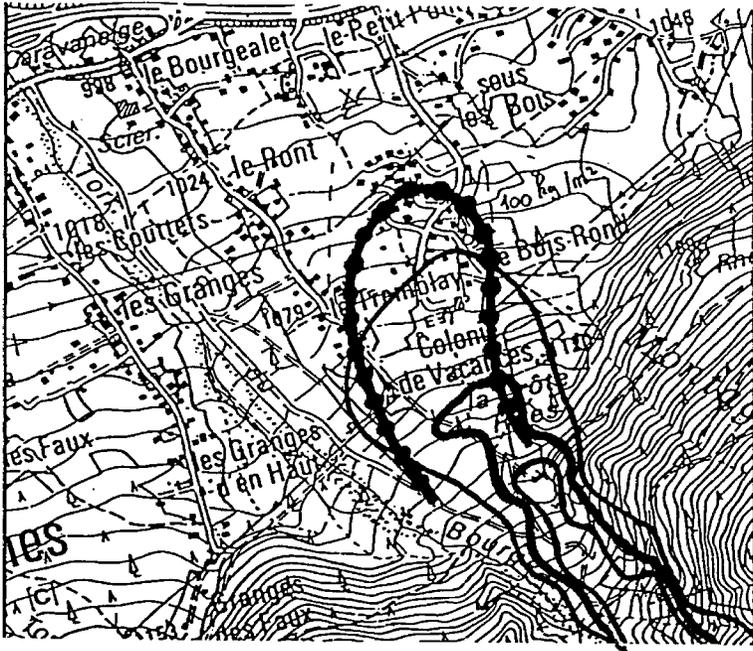


Figure 4
Modélisation de l'avalanche de référence diminuée de 30% de masse de neige

Enquête de terrain - Avalanche de référence (26 décembre 1993)

 Limite de la zone au-delà de laquelle les dégâts sont négligeables

Modélisation

 Limite de pression supérieure à 100 daN/m²
 Limite de pression supérieure à 1000 daN/m²
 Limite de pression supérieure à 2000 daN/m²

Ces résultats doivent être analysés par l'expert, en tenant compte :

- du nombre et de la qualité des données mesurées sur l'avalanche de référence
- du nombre et de la qualité des évaluations faites pour les paramètres non mesurés
- des simplifications faites dans la modélisation (dans le cas présent, par exemple, la présence d'une digue déflectrice de 5 m de haut a été négligée dans la modélisation).

Ces résultats peuvent néanmoins permettre à l'expert de mieux apprécier l'évolution des limites entre zones selon les coefficients de sécurité fixés (la marge de sécurité pouvant ainsi être définie par une augmentation de la masse de l'avalanche qui sert de référence et non plus seulement comme une bande -de largeur difficile à choisir- au-delà de l'emprise de l'avalanche de référence).

EN CONCLUSION : GRACE A LA MODELISATION NUMERIQUE DE L'AEROSOL DU BOURGEAT, DES APPRECIATIONS MIEUX QUANTIFIEES POUR EXTRAPOLER RAISONNABLEMENT AU-DELA DU PHENOMENE DE REFERENCE SUFFISAMMENT CONNU, SOUS LE CONTROLE DE L'EXPERT RESPONSABLE.

Dans le cas du Bourgeat, la modélisation numérique de l'aérosol a été possible grâce aux données disponibles sur l'avalanche de 1993 (photos et enquête minutieuse sur les dégâts) et, également, grâce aux évaluations, toujours discutables, faites par l'expert des données nécessaires non mesurées. Par ailleurs, cette avalanche était suffisamment importante et exceptionnelle pour pouvoir servir de référence dans le zonage réglementaire des risques, sans avoir à beaucoup extrapoler au-delà de cette référence.

La modélisation a alors permis de mieux apprécier l'évolution des limites entre zones selon les marges de sécurité fixées.

Mais tout ceci ne constitue finalement qu'un élément supplémentaire parmi tous ceux (l'historique du site et la connaissance du terrain notamment) qui permettent à l'expert d'arrêter un zonage réglementaire des risques d'avalanches.

Mai 1995

Références bibliographiques

- Beghin (P.) et Olagne (X.), 1991 - Experimental and theoretical study of the dynamics of powder snow avalanches, *Cold Reg. Sc. and Tech.*, 19, pp. 317-326
- Charlier (C.), 1982 - Proposition pour une cartographie des risques naturels en France - Les risques d'avalanche, Grenoble, CEMAGREF, 13p.
- Charlier (C.) et Marco (O.), 1995 - Modélisation et expertise, *Glaciologie et Nivologie - Etat des recherches et des connaissances à la fin du XXe siècle*, Société hydrotechnique de France, pp. 23-31
- Naaim (M.) 1995 - Modélisation numérique des avalanches aérosols, *Glaciologie et Nivologie - Etat des recherches et des connaissances à la fin du XXe siècle*, Société hydrotechnique de France.

Snow hazard information system in Slovenia

Système d'information sur le hasard d'avalanches en Slovénie

A. Horvat¹

RÉSUMÉ

La Slovénie est plus menacée par les avalanches qu'on ne se rend compte dans la vie quotidienne. Au moins 715 avalanches menacent les voies de communication et au moins 140 d'autres, menaçant les maisons et immeubles, les édifices industriels, les pistes et centres de ski et les lignes de haute tension. En Slovénie, la couche de neige montre une grande variabilité dans le temps et l'espace au point de vue des hauteurs maximales et de sa durée. Le système d'information sur le hasard d'avalanche, représente la base qui assure la protection contre les avalanches temporaire et permanente. En même temps il le faudrait compléter par le cadastre des terrains du risque potentiel d'avalanches.

ABSTRACT

Avalanches represent much greater threat to Slovenia than general public is aware of. At least 715 avalanches endanger roads and 140 avalanches pose a serious threat to residential areas, farm buildings, ski resorts and power lines. There is a huge regional and seasonal variation in the duration and maximum height of the snow cover in Slovenia. The snow hazard information system on potential damage caused by avalanches and snow sliding, represents a firm basis for temporal and permanent protection against avalanches. Therefore, such a system should include all potential avalanche areas, the register of which has yet to be completed.

1 INTRODUCTION

A detailed snow hazard information system was developed in order to assure an efficient protection of populated areas against snow hazard. The principal study "The estimate of avalanche danger in Slovenia", which has been carried out by our Enterprise for torrent and erosion control and was financially supported by the State office of protection and preservation and the Ministry of environment and landscape planning, was based on the work of F. Bernot and P. Šegula - "Preliminary report on the register of avalanches in Slovenia (1)." Beside that preliminary study, we also used many different sources, dealing with snow avalanches in Slovenia (all sources are cited in the literature). This article presents the principal findings from the study "The estimate of avalanche danger in Slovenia".

¹ Msc., Technical Director, Podjetje za urejanje hudournikov, Hajdrihova 28, Ljubljana, Tel.:(386)-61-215-090, Fax:(386)-210-030, Lecturer in the University of Ljubljana-Biotechnical Faculty, Department of Forestry, Večna pot 53, 61000 Ljubljana, Slovenia

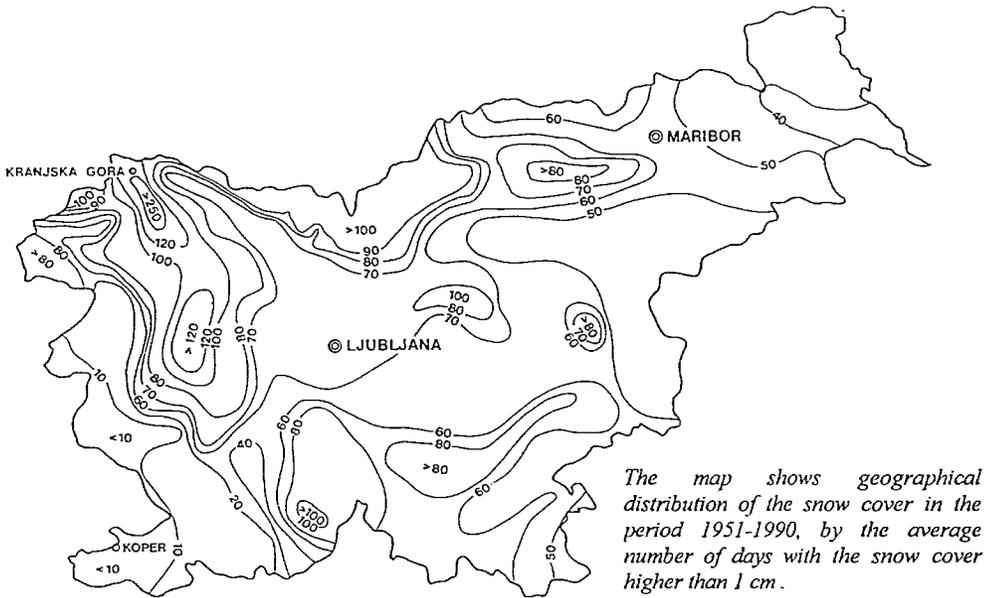
2 OBJECTIVES

Our main objectives were to analyze the threat of avalanches in Slovenia and to develop a snow hazard information system. We reviewed and supplemented the existing data on snow cover and avalanche paths. We have processed the meteorological data on the height, duration of snow cover and the intensity of snowfall. We also gave an estimate of damage caused by avalanches.

3 ANALYSIS OF SNOW COVER IN SLOVENIA

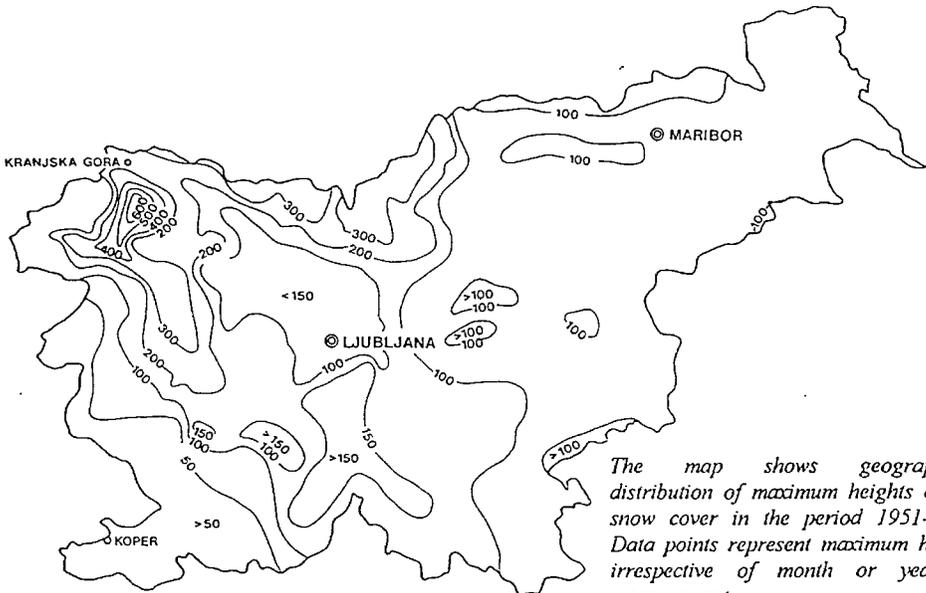
We have analyzed the duration of snow cover higher than 1 cm, maximum height of the snow cover, occurrence of the first snow cover in autumn, occurrence of the last snow cover in spring and the highest recorded intensity of snowfall in Slovenia.

3.1 DURATION OF THE SNOW COVER

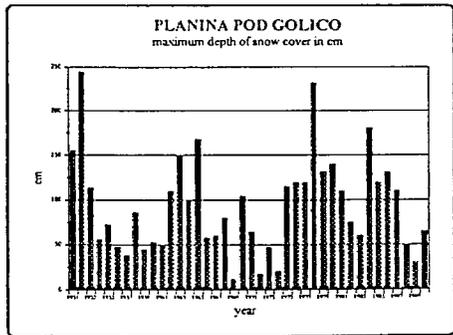
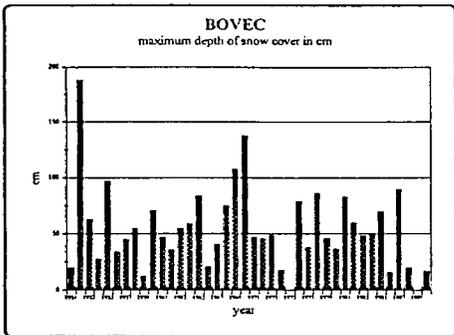


The map shows geographical distribution of the snow cover in the period 1951-1990, by the average number of days with the snow cover higher than 1 cm.

3.2 MAXIMUM HEIGHT OF THE SNOW COVER



The map shows geographical distribution of maximum heights of the snow cover in the period 1951-1990. Data points represent maximum height, irrespective of month or year of measurement.



Graphs of the maximum height (in cm) of the snow cover, measured at the stations Bovec and Planina pod Golico from 1951 to 1989. A huge year to year variation is evident.

The maximum height of the snow cover in Slovenia varies considerably from year to year. Because of the long periods with little or no snow, we may not be aware of the seriousness of the danger posed by avalanches. Huge variation in maximum height of the snow cover from year to year is clearly shown on the graphs for the stations Bovec and Planina pod Golico.

3.3 MAXIMUM INTENSITY OF SNOWFALL

The hydrometeorological center only gathers data on daily intensity of precipitation - snowfall and rainfall. However, such data can be variable because of the different density of the new snow. Therefore, we analyzed the maximum daily increase of the snow cover at the occurrence of heavy snowfall (January 1929; February 1952; February 1969; March, April 1975; February 1986; January 1987).

Based on rough analysis of these data, we can make the following general points:

1. In Dolenjska (Lower Carniola), Štajerska (Styria) and Posavje (Sava Basin) up to 30 cm of snow fell in 24 hours.
2. In Gorenjska (Upper Carniola), Zgornje posočje (Upper Soča Basin) and in the prealpine mountains of Julijske Alpe (Julian Alps), including Dolomites of Polhov Gradec, 65 cm of snow fell in 24 hours in the lower areas and in the regions with normally low precipitation, whereas 115 cm of snow fell in the upper areas and in the regions with normally high precipitation.
3. As there are not many meteorological stations in the area of Kamniško-Savinjske Alpe (Kamnik-Savinia Alps), we used the data from Krvavec, which showed that the maximum snowfall in 24 hours was approximately 30 cm.

4 ANALYSIS OF AVALANCHE AREAS

4.1 METHOD

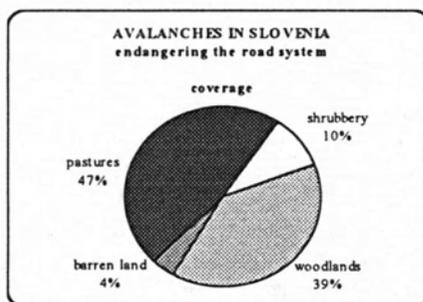
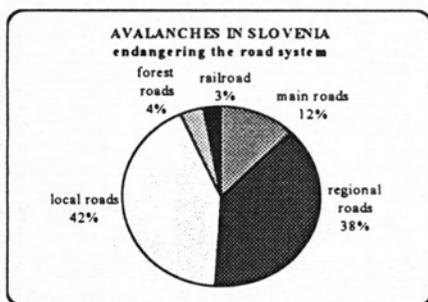
We carried out field observations to gather the information on avalanches endangering residential areas, farm buildings, ski resorts and roads. The data were collected during on site visits and with the help of local people who are familiar with the local situations. All the data from the preliminary avalanche register were verified on the spot and adequately supplemented. Our survey also included some other avalanches around populated areas. Thus, this rather extended study will contribute to a complete analysis of avalanche areas in Slovenia. We also used all available technical literature. Every avalanche path was drawn in the topographic plan in the scale 1:10 000 and adequately described. The location of every avalanche path is defined by a centroid according to the basic geodetic system. Avalanches are numbered in ascending order and for each of them it is indicated on which map of the basic topographic plan it can be found and in which community it is located. A uniform coding system is used to define the communities and the settlements, closest to the avalanche(s). The avalanches are also defined by a code indicating their location with regard to the hydrosystem or road system. Each road is defined by grade and by the nearest two settlements connected by the road. Within the hydrosystem, as well as, within the road system the avalanche areas in kilometers are indicated.

The frequency of avalanches was defined on the basis of recorded avalanche releases and on the basis of vegetation which is a reliable indicator of the individual avalanche frequency categories. Vegetation was also used as an indicator to define a common and maximum size of the individual avalanche path. As already mentioned above, the avalanche paths were drawn in the scale 1:10000. On those maps we marked the boundaries of the normal and maximum anticipated size of known or anticipated avalanches. Later on, less detailed maps in the scale 1:50 000 and 1:400 000 were made. All the data are in digitalized form and can be processed by ARC INFO software.

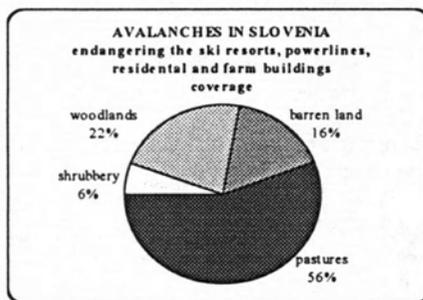
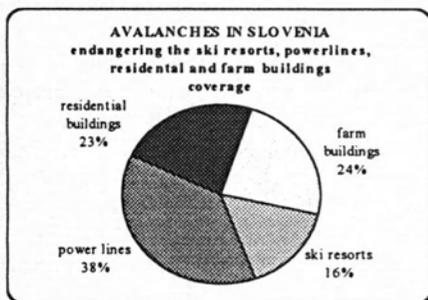
4.2 RESULTS

While we were developing the snow hazard and avalanche information system we discovered that the number of avalanches threatening the populated areas in Slovenia was much greater than previously known. We have processed the data on 1246 avalanches.

ENDANGERED AREAS	NUMBER OF AVALANCHES
main roads	89
regional roads	275
local roads	303
forest roads	29
residential buildings	32
farm buildings	33
ski resorts	22
railroad	19
power lines	53



The graphs show the avalanches endangering the road system, analysis based on coverage; $N^{\circ} = 715$



Graphs illustrating avalanche threat to the ski resorts, power lines, residential areas and farm buildings, analysis based on coverage; $N^{\circ} = 140$

5 DAMAGE CAUSED BY AVALANCHES

On the basis of the available data, which are rather limited, due to unsystematic collection, we can state that avalanches in Slovenia have destroyed at least 29 residential buildings, at least 121 farm

buildings, a cableway station, damaged at least 46 residential buildings, at least 24 farm buildings, at least 2 cableway stations, buried at least 4 cars, 1 tractor and blocked a bus (luckily it was in a tunnel) on the open roads, derailed at least 3 trains, buried or carried away at least 4 snow cats.

Much higher damage was caused in the woods, on the farm and forest land and on power lines.

In Slovenia the largest number of people died in avalanches during the first world war. According to different sources the loss of lives ranged from 613 to 896. In the periods 1777 - 1913 and 1919 - 1994 (May), for which we have the data, there 168 people died in avalanches.

6 CONCLUDING REMARKS

1. The danger of avalanches in Slovenia is much higher than that shown by previous studies.
2. The present study included all avalanches up to date, for which the data were available. Further studies on avalanches in populated and unpopulated areas will undoubtedly increase their number.
3. Maps showing the maximum snowfall and the average duration of the snow cover and thus, defined regions with increased avalanche danger, show great similarity with the summary map of avalanches.
4. Analysis of snowfall in Slovenia shows great variability regarding duration, intensity and thickness, therefore, avalanche disasters occur in relatively long intervals. This may be the main reason for generally ignorant attitude towards temporary and, even more so, towards permanent protection against avalanches.
5. Since 94% of the avalanches, endangering roads and 79% of the avalanches, endangering ski resorts, power lines, residential and farm buildings, are released below the upper forest line, we conclude that avalanche areas could be long-term stabilized successfully and permanently by afforestation between stabilizing constructions. The above data also suggest that, in most cases, unwise use of the land was the main cause of the formation and development of avalanches in populated areas in Slovenia.
6. Avalanches also contribute to increased erosion. At least 82% of the avalanches are on erodible land.
7. The register of avalanches in Slovenia, compiled to assess their potential danger, represents a good foundation for protection and prevention, as well as, for regional planning and proper land use.
8. Planning of specific measures for permanent protection against avalanches must be based on the register of avalanche paths, drawn in the scale suitable for engineering.
9. It is necessary to complete the avalanche register with regions not studied in detail so far. Additionally, a register of potential avalanche areas should be compiled, based on the adequate analysis of natural phenomena and local conditions. Thus, we would establish a complete snow information system.

LITERATURE

1. BERNOT (F.), ŠEGULA (P.), 1983 - *Preliminarno poročilo o delu na katastru snežnih plazov na ozemlju SR Slovenije*. HMZ SRS, Ljubljana, 37 p.
2. MULEJ (F.), 1994 - *Snežni plazovi, smrtne žrtve in materialna škoda*. UJMA 8, Ljubljana, p. 96-103.
3. Več avtorjev, 1994 - *Ogroženost Slovenije s snežnimi plazovi*. Podjetje za urejanje hudournikov, Ljubljana, študija, 116 maps, 42 graphs, 1278 p.

AVALANCHE REPORT

N° : _____ Map code : _____ N° in Atlas of Slovenia : _____
 Community : _____ Code : _____ Settlement : _____
 Hydrosistem : _____ Code : _____ Km : _____
 Road : _____ Code : _____ Km : _____
 Name of location : _____
 Coordinates Y : _____ X : _____

PERSPECTIVE	unit	starting zone	frequent extend	maximal extend
Altitude	m			
Height difference	m			
Average inclination	deg.			
Length of aval. path	m			
Area of avalanche	ha			
		starting zone	track	runout zone
Form of avalanche	sign.	01 slope 02 ditch 03 several branches	01 slope 02 ditch 03 several branches	01 slope 02 ditch 03 several branches 04 fan
Vegetative cover	sign	01 barren land 02 pastures 03 shrubbery 04 woodlands	01 barren land 02 pastures 03 shrubbery 04 woodlands	01 barren land 02 pastures 03 shrubbery 04 woodlands
Earth stability	sign	01 unerosive 02 erosive 03 landslide	01 unerosive 02 erosive 03 landslide	01 unerosive 02 erosive 03 landslide
Fertility	sign	01 fertile 02 mixed 03 infertile	01 fertile 02 mixed 03 infertile	01 fertile 02 mixed 03 infertile
Location	sign	01 above the forest line 02 at the forest line 03 below the forest line	01 above the forest line 02 at the forest line 03 below the forest line	01 above the forest line 02 at the forest line 03 below the forest line
Current standing of avalanche path	sign	01 shrinking	02 unchanged	03 growing
Risk to traffic	sign	01 highways 02 regional roads	03 local roads 04 forest roads	05 railways
Prevailing risks	sign	01 agricultural land 02 forest	03 ski pists 04 power lines	05 residential buildings 06 commerc. buildings
Orientation	sign	01 S 02 SW 03 SE	04 W 05 NW 06 E	07 NE 08 N
Frequency	sign	01 often (1-2 year) 02 sometimes (2-10 years)	03 seldom (10- 25 years) 04 very seldom (25 - 50 years)	05 only in exceptional circumstances (over 100 years)
Remarks				

PROTEON - Vers une prévision locale du transport de neige par le vent

G. Guyomarc'h, L. Merindol¹

RESUME

Depuis 5 années, des mesures de vent et de transport de neige ont été réalisées au Col du Lac Blanc (Alpe d'Huez 2710 m). Ces observations ont permis de mieux prendre en compte les seuils de vitesse du vent associés à chaque type de neige de surface au dessus desquels commence le phénomène de transport.

L'objectif, à terme, de ces travaux est d'améliorer la connaissance du phénomène et ses conséquences sur la répartition et la stabilité du manteau neigeux. Nous avons utilisé les résultats de cette étude pour mettre au point une application qui, à partir d'un vent prévu par adaptation statistique et du type de neige simulé par Crocus (modèle d'évolution du manteau neigeux), évalue la mobilité de chaque strate de neige et prévoit l'occurrence du transport de neige sur le site pour les prochaines 24 heures.

*Cette application (**Protéon** : PRévision de l'Occurrence du Transport EOlien de la Neige) est en test pré-opérationnel pour la saison 94-95 au Centre Départemental de la Météorologie de l'Isère et les résultats disponibles pour le Service des Pistes de l'Alpe d'Huez (SATA) qui a participé à la logistique de cette étude. Lors du symposium, un premier bilan pourra être tiré après une année de fonctionnement.*

ABSTRACT

Over the last 5 years, wind velocity and blowing snow measurements have been made at Col du Lac Blanc site (Grandes Rousses - 2710 m asl). These observations have conducted to better take into account wind speed thresholds in connection with snow particle types of snow pack surface. The short term aim of these works is to improve the understanding of the phenomenon and its consequences on snow distribution and on snow pack stability. We have used the results of this study to develop an application to evaluate :

- the mobility of each snow pack layer depending on its morphological parameters*
- the wind velocity on the site by using statistical adaptation methods.*

*This application, called **Protéon** evaluates the occurrence of blowing snow periods. It has been tested during the last winter season at the avalanche risk forecast service at the meteorological centre of Grenoble and the results are available for the snow-security service of Alpe d'Huez (SATA) which has taken a share in this study.*

¹Météo-France Centre d'Etudes de la Neige 1441 rue de la piscine 38406 Saint Martin d'Hères Cedex
tél. : (33) 76 63 79 18 Fax : (33) 76 51 53 46

1. PRESENTATION ET OBJECTIF

L'objectif de cette étude est de mieux connaître les effets du vent sur la répartition spatiale de la neige, et sur la reprise de particules de neige plusieurs jours après une précipitation. Ces phénomènes entraînent, la plupart du temps, la formation de plaques à structure plus ou moins dure, appelées couramment "plaques à vent", qui, si elles reposent sur des surfaces de faible cohésion, peuvent partir en avalanche.

Au cours des saisons d'hiver depuis 1991, nous avons enregistré, à la fois des mesures de vent (vitesse et direction), températures (air et surface neige), de hauteur de neige (ponctuellement et le long de profils de pente) au pas horaire et effectué des mesures sur site (Col du Lac Blanc - 2710 m) lors d'épisodes de chute de neige ventée ou de reprise de la neige par le vent. Un des intérêts de ces mesures (résistance au cisaillement, densité de la neige, caractérisation fine des particules de neige, ...) est de pouvoir associer aux différents types de neige de surface que l'on rencontre au cours d'une saison, des seuils de vitesse de vent au dessus desquels le déplacement de neige s'effectue.

L'objectif final est de prendre en compte ces phénomènes dans les modèles (**Safran**, **Crocus**) qui simulent l'évolution du manteau neigeux (Durand-1993) (Brun-1992) et analyse sa stabilité **Mepra** (Giraud-1992).

- **Crocus** : C'est un modèle numérique qui simule l'évolution du manteau neigeux en un point dépendant de l'altitude, l'exposition et la pente en fonction des conditions météorologiques analysées par le système **Safran**. La formalisation des résultats obtenus au Dôme des Petites Rousses doit permettre d'introduire dans le modèle des effets locaux d'érosion ou d'accumulation de neige dus au vent. Une modification des caractéristiques morphologiques des particules de neige pendant une précipitation en fonction du vent a d'ores et déjà été introduite.
- **Safran** : Cette application permet, à partir des sorties de modèles météorologiques et des paramètres observés et enregistrés par les stations des massifs alpins (postes nivo-météos, station auto,...), de réaliser une synthèse de ces différentes sources d'information et d'estimer sur les massifs alpins par pas de 300 m et sur 4 expositions les paramètres météorologiques nécessaires à **Crocus** au pas horaire.
- **Mepra** : Ce système expert analyse la stabilité mécanique des profils du manteau neigeux simulés par **Crocus**. Il en déduit un risque de déclenchement naturel d'avalanches codé sur une échelle à 6 niveaux. Une connaissance plus fine des phénomènes de transport de neige par le vent permettra une localisation plus précise du risque de départ spontané d'avalanches et une meilleure gestion du risque localisé (plaque à vent) de déclenchement accidentel d'avalanches.

Une étape intermédiaire de ce travail consiste à fournir un "outil" permettant à un prévisionniste du risque d'avalanche de mieux prendre en compte la présence d'épisodes de transport de neige et donc de formation de plaques à vent lors de l'élaboration de son bulletin. Pour cela nous avons adopté la démarche suivante :

- 1^{ère} étape : Prévision du vent local par adaptation statistique des analyses du modèle Arpège de prévisions météorologiques (utilisé quotidiennement par les centres météo. de France).
- 2^{ème} étape : Prise en compte de l'état de mobilité (par le vent) de la neige de surface.
- 3^{ème} étape : Calcul d'un indice de transport.
- 4^{ème} étape : Validation a posteriori par comparaison entre les valeurs de l'indice de transport et les mesures et/ou observations sur site.

2. PREVISION DU VENT PAR ADAPTATION STATISTIQUE

La première partie de notre travail est, évidemment, d'avoir une bonne connaissance du vent à l'échelle locale. Le site instrumenté du Col du Lac Blanc a la particularité d'être orienté Nord-Sud et les vents sont canalisés essentiellement dans ces deux directions (env. 80% des cas).

Nous avons développé une application statistique destinée à estimer la vitesse et la direction du vent. Le principe consiste à rechercher les relations statistiques entre les sorties du modèle de prévisions météorologiques (nous utilisons des points d'analyse sur une grille 3x3 couvrant les

Alpes françaises) et les mesures du vent sur le site. Nous avons utilisé une méthode de régression multi-linéaire pour établir les équations qui permettront ensuite de calculer les vitesses et direction du vent. La comparaison entre les paramètres mesurés (sur la saison 93-94 non incluse dans le fichier d'apprentissage) et ceux prévus par notre méthode sont montrés sur la figure 1 ci-dessous. Dans la plupart des cas les vitesses de vent sont correctes. Les différences les plus importantes sur la direction n'apparaissent que lorsque les vitesses sont inférieures au seuil de transport le plus bas, les neiges fraîches sont transportées à partir de 4 m/s.

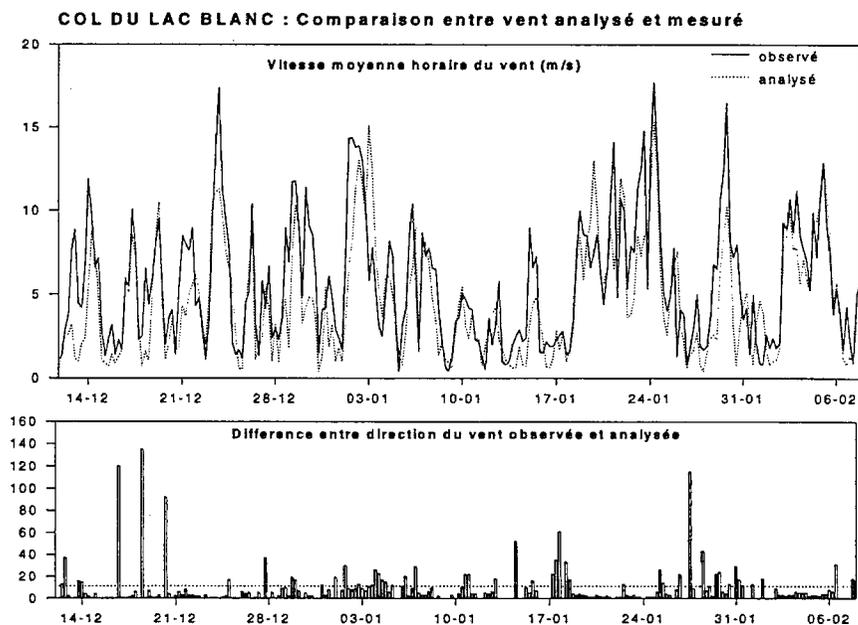


Figure 1 : Comparaison entre les vitesses de vent mesurées (trait continu) et celles analysées (trait pointillé) sur le site du Col du Lac Blanc. Le graphique du dessous montre les valeurs absolues de la différence entre direction du vent mesurée et estimée (le trait pointillé représente la moyenne des différences).

3. ETAT DE MOBILITE DE LA NEIGE DE SURFACE

La deuxième étape de l'étude consiste à connaître, le plus précisément possible, l'état de surface du manteau neigeux, en particulier le type des particules de neige, leurs caractéristiques morphologiques et leur cohésion. Pour cela nous avons choisi d'utiliser une version de **Safran-Crocus** qui nous permet de suivre l'évolution temporelle du manteau neigeux en simulation sur le poste du Col du Lac Blanc (le manteau neigeux se présente sous la forme d'un profil vertical des différentes strates de neige, chacune étant caractérisée par des paramètres spécifiques).

Nous avons ensuite voulu qualifier, en termes de résistance à l'érosion par le vent, la neige de surface. Pour décrire de manière continue l'évolution des particules de neige déposée au sol, celles-ci sont caractérisées -entre autres- par un ensemble de paramètres : la dendricité (variant de 1 pour la neige fraîche à 0 pour la neige de type grains fins ou faces planes), la sphéricité (de 0 à 1), la taille (0,3 à 1,5) et l'historique de la couche de neige (par exemple : la strate a-t-elle subi une phase liquide?). Les mesures terrain ont permis de vérifier que la résistance à l'érosion de la neige dépend beaucoup de la cohésion inter-granulaire, celle-ci étant directement liée à l'association dendricité-sphéricité pour la neige récente. De plus, une couche de neige ayant subi

une phase liquide est considérée comme étant impossible à éroder, soit parce qu'elle comporte encore de l'eau sous forme liquide, soit que cette eau est regelée (croûtes).

Nous avons donc analysé chaque profil **Crocus** de la surface vers le sol. Nous avons estimé pour chaque couche un indice de mobilité en fonction des caractéristiques morphologiques des particules de neige et en arrêtant l'analyse lorsque l'on rencontre une couche considérée comme non-mobilisable pour une gamme de vents horaires moyens de 4 à 30 m/s.

Nous avons ainsi séparé pour chaque couche l'analyse en 2 cas, selon que la neige de cette strate a une dendricité non nulle (neige récente) ou pas (neige ayant subi des métamorphoses par effet de gradient ou par humidification), deux fonctions permettent de calculer l'indice de mobilité de la couche donnant une information sur le caractère plus ou moins *mobilisable* des grains de neige. Cet indice évolue entre -1, pour les neiges de type grains ronds de taille 1,5 mm, à +1 pour les neiges fraîches tombées avec un vent moyen inférieur à 4 m/s, il caractérise donc la plus ou moins grande résistance des particules de neige à l'érosion par le vent.

4. PREVISION DE L'OCCURRENCE D'UN EPISODE DE TRANSPORT

Les données terrains (Guyomarc'h-1991), (Castelle-1994) ont permis de déterminer par plusieurs méthodes, des associations type de grains (que l'on peut traduire en rapport dendricité-sphéricité ou sphéricité-taille) et vitesse moyenne horaire du vent ayant provoqué le début du transport :

- il s'agit d'abord des observations effectuées lors des missions sur site qui ont permis de collecter des échantillons de particules de neige au sol et dans le flux de transport.
- les profils de densité de neige transportée donnent également une information sur la masse de neige déplacée pour différents épisodes (type de grains et vitesse du vent).
- la comparaison a posteriori entre les fluctuations des différences entre valeurs maximales et minimales horaires du capteur de hauteur de neige installé au Col du Lac Blanc et les vitesses de vent observées simultanément nous informe sur la présence ou non de particules en saltation. On peut alors connaître l'état des strates de surface du manteau neigeux par une simulation Crocus. Enfin, en utilisant les données du pluviomètre chauffant, on peut alors discriminer entre chutes de neige ventée et épisodes de transport.

Nous avons ainsi pu, pour chaque pas de 6 heures (correspondant à la disponibilité des analyses météorologiques), mettre en relation le vent prévu et la valeur de l'indice de mobilité pour calculer un indice de transport de neige par le vent. Celui-ci permet de discriminer entre les épisodes de transport (valeur positive de l'indice) et de non transport (figure 2). Nous pouvons fournir alors l'épaisseur de neige qui pourra être érodée.

Indice de transport de neige par le vent

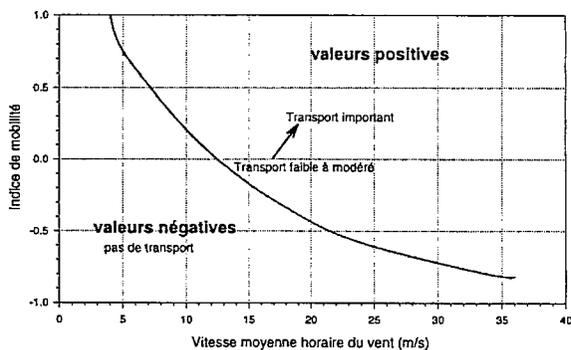


Figure 2 : Ce graphique montre les deux domaines de la fonction, la courbe représente les valeurs seuils de vent déterminant le démarrage du transport.

L'évolution sur 7 jours de la valeur de l'indice de transport et l'épaisseur de neige susceptible d'être déplacée est présentée sur un graphique, cette information est intégrée à la chaîne Safran-Crocus-Mepra et est disponible sur l'écran du prévisionniste avalanches Isère (figures 3 et 4).

Date	20-01-95			21-01-95			22-01-95		
Heure	6h	12h	18h	0h	6h	12h	18h	0h	6h
Vent m/s	6	5	6	6	1	2	1	1	2
Proteon deg	190	190	190	180	var.	360	var.	var.	340
Transp. de neige	oui	oui	oui	oui	non				
Ep. en cm transportable	37	20	22	24					
Epaisseur pot. transportable	54	70	66	66	94				

Figure 3 : Tableau des résultats de *Protéon* tels qu'ils apparaissent au prévisionniste avalanche

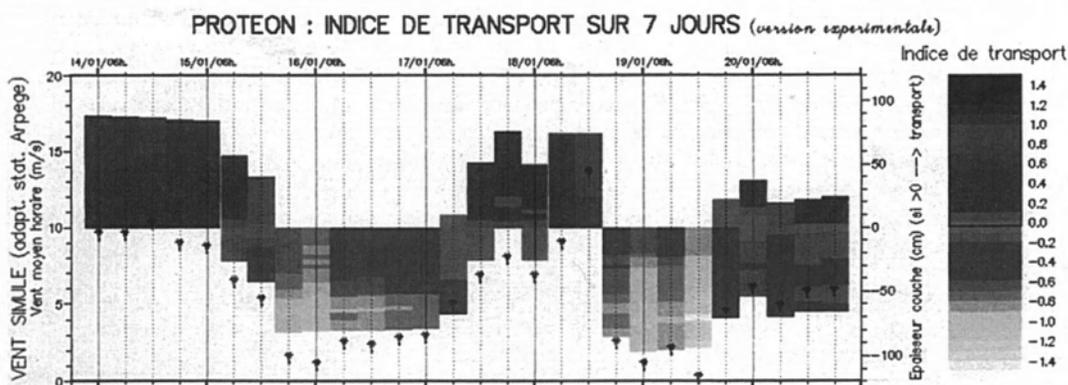


Figure 4 : Evolution de "l'indice de transport" sur le site du Col du Lac Blanc entre le 14 et le 21 janvier 1995. L'axe des Y (à droite) indique l'épaisseur de neige susceptible d'être érodée par le vent, les strates de neige sous le zéro indiquent l'épaisseur de neige qui serait transportée si la vitesse du vent augmente. L'axe des Y à gauche donne la valeur du vent prévu.

5. TESTS ET VALIDATION DU MODELE

Pour la validation de ce modèle, l'indice de transport a été calculé, toutes les 6 heures, sur la saison 92-93 en utilisant le vent mesuré. Ensuite nous avons comparé les résultats avec les périodes de transport détectées sur le site en utilisant le capteur de hauteur de neige (figure 5).

Evènements prévus \ observés	sans transport	avec transport
	sans transport	75.7 %	14 %
avec transport	2.3 %	8 %

Figure 5 : tableau de contingence des comparaisons *Protéon*/observations terrain (776 cas).

Sur cette période, nous avons pu prévoir 80% de l'ensemble des événements de transport observés qui représentent 10,3% du temps sur l'ensemble de l'hiver 92-93. En revanche nous avons provoqué dans 14% des cas des fausses alertes. Nous espérons améliorer ces résultats en essayant de prendre en compte le temps nécessaire à l'érosion d'une strate de neige; actuellement si les conditions restent identiques (vitesse de vent et état de surface de la neige) pendant plusieurs pas de temps nous estimons la même épaisseur de neige transportable. Or les observations sur site ont montré que la strate de neige transportable exposée au vent peut disparaître en quelques heures.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

A partir de l'expertise du Centre Départemental Météo de Grenoble et des premières validations réalisées grâce aux capteurs de détection du transport de neige, nous pouvons noter les points suivants :

- Le système Protéon peut constituer une mémoire des événements de transport du passé,
- il apporte une information pendant les chutes de neige ventées, mais, la plupart du temps, elle est déjà connue du prévisionniste par d'autres sources, (observations nivo-météo, ...)
- son apport est limité par le fait que, d'une part, il n'y a pas de modification dynamique de la morphologie des grains de neige pendant un épisode de transport et que nous ne disposons pas de fonction du temps et du type de neige pour éroder une strate de neige,
- enfin, il serait nécessaire d'aller plus loin dans l'information sur les conséquences du transport de neige sur la formation et la localisation des plaques.

Par ailleurs, dès que la version Safran "prévision" sera opérationnelle, notre module permettra une prévision du transport pour la journée suivante, et non plus un suivi des conditions au jour le jour.

7. BIBLIOGRAPHIE

Brun E., David P., Sudul M., Brunot G., 1992 A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting.

J. of Glaciology, Vol. 38,, pp 13-22.

Castelle T. 1994 *Transport de neige par le vent en montagne : approche expérimentale au Col du Lac Blanc.*

Thèse de docteur es sciences techniques de l'EPFL..

Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E. 1993. Meteorological estimation of relevant parameters for snow models.

Annals of Glaciology, vol. 18 p65-72

Giraud G. 1992. Mepra : an expert system for avalanche risk forecasting.

Proceedings of 92'ISSW Breckenridge-CO (USA)

Guyomarc'h G., L. Mérindol 1991. Etude des conditions de transportabilité de la neige sur un site de haute montagne.

La Houille Blanche 5-91 p387à 391

Guyomarc'h G., Mérindol L; Sivardière F., Castelle T., Buisson L. 1994.

Blowing Snow and Avalanches. *Proceedings of 94'ISSW* Snowbird-UT (USA)

Project of elaboration of a cadastre of avalanche paths in the catalan Pyrenees

Projet d'élaboration d'un cadastre de localisation d'avalanches dans les Pyrénées catalanes

G. Martí, P. Oller, B. Bisson,
J. Gavaldà, J. García, P. Martínez¹

RESUME

Depuis 1986, le "Servei Geològic de Catalunya" (S.G.C.), -sous la tutelle aujourd'hui de "l'Institut Cartogràfic de Catalunya" (I.C.C.)-, en collaboration avec le "Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia de la Universitat de Barcelona", travaille sur un Programme de systématisation des Cartes de Localisation d'Avalanches dans les Pyrénées catalanes. Le but de ce travail est de localiser et de décrire toutes les zones exposées à des hasards d'avalanches.

Les documents obtenus sont la Carte de Localisation d'Avalanches et le Registre des fiches reliées à chacune des avalanches représentée sur la Carte. Ces deux documents réunis constituent le Cadastre des Avalanches.

Après plusieurs années d'expérience en cartographie d'avalanches, une modification de la légende a été évoquée afin d'interpréter au mieux les différentes sources d'information.

Les caractéristiques d'un Système d'Informations Géographiques (S.I.G.) font de ce système un bon outil pour traiter des phénomènes avalancheux. L'objectif de ce projet est de constituer un véritable cadastre automatique, qui permette, dans le futur, une consultation et une exploitation meilleures des informations acquises, grâce à une plus large utilisation de l'outil S.I.G.

ABSTRACT

Since 1986 the "Servei Geològic de Catalunya" (S.G.C.), at present subordinated to the "Institut Cartogràfic de Catalunya" (I.C.C.), in collaboration with the "Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia de la Universitat de Barcelona" is carrying out a systematic Avalanche Paths Mapping Programme in the Catalan Pyrenees with the aim of locating and describing all those areas exposed to avalanche hazard.

The obtained documents are the Avalanche Paths Maps and the Avalanche Registry related to each avalanche represented in the map. The integration of both documents constitutes the Avalanche Cadastre.

¹ Servei Geològic de Catalunya. Institut Cartogràfic de Catalunya. Parc de Montjuïc E-08004 Barcelona. Telephone: 4252900, fax: 4267442.

From some years of experience mapping avalanches, it is thought that the legend should be modified in order to perform the different information sources established. For this reason some changes have been made in the legend of the avalanche maps.

For the characteristics of the Geographic Information System (GIS), this system appears to be a good tool to treat avalanche information. The objective to be reached is to constitute an automatic cadastre which will allow in the future a better consultation and exploit of the avalanche information with the increasing use of the GIS capabilities.

1. INTRODUCTION

The Avalanche Risk Project was started in 1986 as a consequence of an important increase in tourism in areas traditionally depopulated. This fact implies an increase of hazard due to a land use change of high mountain areas of the Catalan Pyrenees because of an increment in human presence and socioeconomical structures associated which are vulnerable to avalanche risk.

The Avalanche Paths Maps is a thematic map where all those areas affected by avalanches are represented and the Avalanche Registry is the avalanche descriptive forms concerning to each avalanche. All those documents are intended to aid those in need of information concerning hazards related to land use planning.

Since the last century, there has been a depopulation in the Catalan Pyrenees areas implying an absence of witnesses and information related to avalanches. For this reason, in the Catalan avalanche legend, the information is represented at present as follows: 1) orange colour means the avalanches paths determined by photointerpretation and 2) violet colour represents those ones determined by field work: morphology of the paths, observation of the avalanche effects, and interviews to the inhabitants and people living in mountain areas.

Because of the need of showing the different sources of information in the avalanche paths maps, our work group has thought to change the legend by representing the areas photointerpreted and field interpreted in orange colour, and in violet colour only the population inquiries.

The GIS is an organized computer system which is able to store, update, manipulate, display and analyze georeferenced data. For its characteristics, GIS gives us the ability to associate the avalanche paths maps with the avalanche descriptive data constituting in this way a real automatic avalanche cadastre. In this sense, the Avalanche Registry (descriptive forms) has been stored in dbase format files using the DBASE IV program, and the Avalanche Paths Maps using the ARC_INFO program.

2. ELABORATION OF THE AVALANCHE PATHS MAPS

Avalanches are a natural, recurrent phenomenon well known at present. The Avalanche Paths Maps is a thematic map where all those areas affected by avalanches are represented. These maps are made considering the criteria of recognition applied to the methodology used (photointerpretation, field interpretation and population interviews).

2.1. Criteria of recognition of avalanches

The criteria used to recognize the avalanche paths are related to the intrinsic characteristics of mountain slopes (Martinelli 1974, Armstrong & Armstrong 1977, Furdada i Vilaplana 1989, Mases i Vilaplana 1991, Mears 1992, Pietri 1993, Furdada i Martí 1994, Furdada et al. 1995) which are the following: altitude of the starting zone, topography and slope angle of the starting zone, morphology, rugosity, vegetation (landscape observations and detailed observations), orientation to the sun and orientation to the prevailing winds.

The use of all these criteria, when possible, allows to recognize the maximum boundary affected by avalanches using photointerpretation and field recognition methods.

2.2. Photointerpretation

The use of aerial vertical photographs allows to observe the morphology of the entire slope and in this way the identification of the avalanche paths.

The used photos are from different flights depending on their quality and availability. The flight of 1956 (1:33.000) is from the "Servicio Geográfico del Ejército". (S.G.E), and those ones of 1974 (1:18.000) and of 1988 (1:22.000) are from the I.C.C.

2.3. Field recognition

This method consists of the identification and description of the avalanche paths determined previously by photointerpretation. The corroboration of the avalanche paths is mapped during summer seasons when the criteria are better observed due to the absence of snow cover.

2.4. Population inquiries

Once the photointerpretation and field recognition have been attained some interviews to the inhabitants in the Pyrenees have been made in order to obtain information about historical avalanche events. These tasks will be done in a methodical way by the S.G.C. in collaboration with the Town Councils to achieve a systematic population inquiry which has not been done yet.

3. THE OBTAINED DOCUMENTS

All the information collected is represented in two complementary documents: the **Avalanche Paths Maps** and the **Avalanche Registry**. The integration of both documents constitutes the **Avalanche Cadastre**.

The **Avalanche Paths Maps** is an inventory of all those areas affected by avalanches. These maps are represented on a topographical base enlarged at 1:25.000 scale from the 1:50.000 original scale distributed by the S.G.E.. In fact, what is represented in these hazardous maps is the maximum boundary of the avalanche paths, but not calculated by theoretical models. These maps neither represent any return period nor the kind of avalanche. The legend of these maps is explained in the next chapter.

The **Avalanche Registry** is the whole avalanche descriptive forms concerning to each avalanche represented in the map. It includes an oblique photo of the avalanche path. The information contained in these forms refers to the characteristics of the starting zone, the track zone, the run out zone, using those criteria explained above, and other information about the type of avalanche, return period, damages, etc. by inquiring witnesses. Each avalanche has a reference and a code

referred to the valley where the avalanche is located. This code is included in the avalanche paths maps.

The **Avalanche Cadastre** is the result of linking the both documents explained above. This cadastre must be capable of giving all the available avalanche information to the users. For this reason GIS appears to be the best tool to manage all these information. At present the **Atlas of Location of Avalanche Paths**, which are the avalanche cadastre of all those areas mapped until now, have been completely hand-made. They include the avalanche path map, the avalanche registry and the oblique photos of the area.

4. LEGEND OF THE AVALANCHE PATHS MAPS

After several years mapping avalanches our avalanche work group has thought to modify the legend of the avalanche paths maps in order to distinguish the different sources of information. In order to understand it, let us make an overview to the preceding works on this matter.

4.1. Previous works

The avalanche maps in the Catalan Pyrenees produced until now have been made using an adaptation of the French legend of the "Carte de Localisation Probable des Avalanches (CLPA)" (CEMAGREF, 1981).

In the Catalan legend the information is the result of: 1) aerial photointerpretation, 2) interviews to the inhabitants of mountain areas, 3) field observations of avalanche effects. 1 is represented in orange colour and 2+3 in violet.

This legend was adopted because of the absence of information related to avalanches due to a great depopulation in high mountain areas in the Catalan Pyrenees.

4.2. New legend of the Avalanche Paths Maps

Nowadays, one of the objectives in the mapping programme is to represent the different sources of information in the avalanche paths maps which will be more clear with this new legend consisting of representing: 1) in orange colour only the avalanche paths determined by photointerpretation and field recognition through the criteria explained above and 2) in violet colour only the population inquiries.

The modification of the legend implies a substantial change in the methodology used by the S.G.C. in charge of making the avalanche mapping. The photointerpretation and field recognition tasks must be completed with the systematic population inquiries. For this reason a close coordination between the cartographers of the S.G.C. and the mountain Town Councils will be necessary.

5. AUTOMATION OF THE AVALANCHE CADASTRE

The avalanche paths maps and the avalanche descriptive forms represent a great amount of information that have to be managed. The final aim is to integrate all these data in an only GIS

system, Arc-Info in this case, because it will allow to consult and to exploit more efficiently all the avalanche data available constituting in this way a real automatic avalanche cadastre.

The automation is the treatment of the information which includes: digitizing or rasterizing the avalanche paths maps, generation of thematic coverages, expansion of the avalanche databases and their codification adding the respective codes to each avalanche, generation of regions from the initial coverages and the link between the avalanche paths and the avalanche data files.

In order to achieve these goals all the information concerning to the description of avalanches (avalanche descriptive forms nowadays recorded in DBASE IV program) will be reorganized using a data base ORACLE which allows a better consultation and data manipulation even from other programs. These tasks will be carried out in the frame of the Student Grant of Collaboration with the University of Lleida. A link between ORACLE and ARC-INFO will be done so that the avalanche data can be consulted from ARC-INFO.

At the present time, 70% of the Catalan Pyrenees has been already mapped. In short the avalanche paths maps will be automated using a common updated digital topography. For this reason the next step in the mapping programme is to adapt all the avalanche paths maps to this new topographical base and after digitizing or rasterizing, in function of the resulting proves, all the information with the aim of integrating in ARC/INFO version 7. The use of this new version includes the possibility of working with a new feature class called Region.

The region feature class offers an extended approach to modelling complex areas like avalanche paths. Regions can represent and handle noncontiguous, nested and overlapping areas so, data management is more efficient, as each region only requires one attribute record, (ESRI, ArcDoc version 7).

As mentioned above the generation of an automatic cadastre is the final objective. The Avalanche Paths Maps is a complex document where, in many cases, a single avalanche path identified by an only code is represented by noncontiguous polygons joined by an arc which represents the track zone and, in many other cases, polygons from different avalanches are overlapped. These cases are treated by making some proves with the region feature class in a pilot area. In this sense the use of the regions feature class could be more efficient to link the avalanche descriptive files by creating one region for one code (it means one avalanche) which is the link item between the Avalanche polygons represented in the Avalanche Paths Maps and the avalanche files from the Registry. These proves are carried out in the G.I.S and avalanche work groups of the I.C.C. and in the frame of the Human Capital and Mobility European Project.

6. CONCLUSIONS

The Avalanche Mapping Programme follows two lines of work: production and development. The edition of the Avalanche Paths Maps is the main objective in the production line, and the construction of a real automatic avalanche cadastre is the aim of the developing line. All these goals are put under the changes of the new avalanche legend and the new topographical base.

7. BIBLIOGRAPHY

- Armstrong (R.) & Armstrong (L.), 1987. *Avalanche Atlas*. Ouray Country, Colorado. I.A.A.R. Univ. of Colorado. Occasional paper n. 25.
- C.E.M.A.G.R.E.F., 1981: *Plan des zones exposées aux avalanches*. Ministère de l'Agriculture. France.
- Didion (E.), 1990. *Systèmes d'Information Géographique: Concepts. Fonctions. Applications*. Laboratoire Commun de Télédétection. CEMAGREF/ENGREF. Montpellier. 44 p.
- E.S.R.I., 1987 *Understanding GIS. The Arc-Info method*. Environmental System Research Institute. Inc., Redlands, CA, USA
- Furdada (G.) i Vilaplana (J.M.), 1988. *Memòria del Mapa de Localització Probable d'Allaus. Atlas de Zones Probables d'Allaus: Tasques complementàries. Fase I* (informe del Dpt. de Geol.din., Geof.; i Pal.;U.B.), *de l'Estudi del Risc d'Allaus al Pirineu Català*. Servei Geològic de Catalunya, Generalitat de Catalunya. Inedited.
- Furdada (G.) i Vilaplana (J.M.), 1989. *Memòria del Mapa de Localització Probable d'Allaus. Atlas de Zones Probables d'Allaus: Tasques complementàries. Fase II* (informe del Dpt. de Geol.din., Geof.; i Pal.;U.B.), *de l'Estudi del Risc d'Allaus al Pirineu Català*. Servei Geològic de Catalunya, Generalitat de Catalunya. Inedited.
- Furdada (G.) y Martí (G.), 1994. La elaboración de los Mapas de Localización Probable de Aludes. In J. Arnáez, J. M. García Ruiz y A. Gómez Villar . *III Reunión de Geomorfología*. Logroño. Vol I pp. 175-189.
- Furdada (G.), Martí (G.), Oller (P.), García (C.), Mases (M.) and Vilaplana (J.M.), 1994. Avalanche mapping and related G.I.S. applications in the Catalan Pyrenees. *Surveys in Geophysics*. (in press).
- Gavalda (J.), Martí (G.), Oller (P.), Martínez (P.) and García (C.), 1994. Project for studying the avalanche risk in the Catalan Pyrenees: Present and Future. *I European Congress on Regional, Geological Cartography and Information Systems*. Bolonia.
- Martinelli (Jr.,M.), 1974. *Snow avalanche sites, their identification and evaluation*. U.S. Government Printing Office. 27 p.
- Mases (M.) y Vilaplana (J.M.), 1991. Zonas de aludes en la Vallferrera: clasificación y riesgo geomorfológico. *Pirineos*: 138, 39-52.
- Mears (A.I.), 1992 *Snow Avalanche Hazard Analysis for Land-Use Planning and Engineering*. Colorado Geological Survey; Dpt. of Natural Resources. Bulletin 49. Denver, Colorado. 54 p.
- Oller (P.), Cuevas (J.L.), Furdada (G.), Mases (M.) y Vilaplana (J.M.), 1992. Cartografía de las zonas de aludes en el Pirineo catalán y el uso de los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.). *Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables*; Vol I, 135-146.
- Pietri (C.), 1993. Renovation de la carte de localisation probable des avalanches. *Reveu de Géographie Alpine*, n. 1, tome LXXXI, p. 85-97.

Bulletin avalanche et communication assistée par ordinateur : premières réalisations

R. Bolognesi¹, F. Guillaud²

RESUME

Le bulletin avalanche constitue depuis toujours un maillon essentiel de la prévention des accidents d'avalanche. Depuis de nombreuses années, les différents services de prévision européens fournissent un effort de recherche important pour toujours améliorer sa qualité. Jusqu'à présent, cet effort a porté principalement sur le développement de méthodes et d'outils d'aide à l'analyse ou à la prévision des risques d'avalanches car la pertinence de l'information délivrée constitue, bien sûr, une priorité. Les aspects "formulation" et "diffusion" du bulletin sont néanmoins tout aussi importants car ils déterminent l'impact et la portée du bulletin. Or, communiquer est un exercice difficile. Cet article présente les tout premiers outils conçus pour le simplifier.

Les travaux réalisés portent sur deux thèmes distincts : la formulation du message d'une part, et son conditionnement d'autre part.

Afin d'optimiser et de standardiser la formulation du bulletin, un éditeur spécifique a été implémenté. Il s'agit d'un logiciel qui effectue une rédaction automatique du message (après contrôle de sa cohérence) selon le diagnostic du prévisionniste, puis une traduction instantanée en quatre autres langues. Un premier sondage d'opinion mené dans diverses stations de ski en France et en Suisse, tant auprès des skieurs occasionnels que des professionnels de la neige, tend à montrer que le bulletin automatique est très bien perçu par ce public.

Dans la mesure où l'information est de nature éphémère il est souhaitable de la distribuer en "temps réel". Elle doit donc se présenter sous la forme de fichiers numériques lui permettant de transiter par les réseaux de télécommunication. Elle peut ensuite se décliner de différentes façons, pouvant prendre la forme d'une page vidéotex consultable à distance sur un serveur télématique, d'un message généré par restitution ou synthèse vocale, ou encore d'un document écrit délivré par fax. Ces différentes technologies sont exploitables simultanément à l'aide d'un unique serveur plurimédia.

A ce jour, ces réalisations, déjà opérationnelles, constituent des outils efficaces qui peuvent facilement être intégrés dans tout schéma de communication.

ABSTRACT

The avalanche bulletin has always constituted an essential link for the prevention of avalanche accidents. For many years, the various European warning services have contributed important research to ameliorate its quality. Up to date, these efforts have mainly consisted in the development of forecasting support methods- or tools, because obviously the pertinence of the given information is of utmost importance. However the aspects of formulation and distribution of the bulletin are important as well since they determine the impact and readership of the bulletin. But communication is a difficult job.

¹ IFENA, Weissfluhjoch, CH-7260 Davos. Tel : (41) 81 417 01 53 ; Fax : (41) 81 417 01 10

² Soprane, 11 chemin du vieux chêne, F-38240 Meylan. Tel : (33) 76 90 30 11 ; Fax : (33) 76 41 54 31

This paper presents the very first tools in order to simplify this task.

The work done so far concentrates on two distinct themes : the formulation of the message and its presentation.

In order to optimize and standardise the formulation of the bulletin, a special computer editor was implemented. This edits the message automatically (after coherence checks) according to the diagnosis of the forecaster and then gives immediately a translation into four other languages. A first opinion poll among several ski resorts in France and Switzerland, including occasional skiers as well as snow professionals showed that this automated bulletin is well received by these people.

Because the information is ephemeral, it is desirable to distribute it in "real time". Therefore the message must be on a numerical file that can be broadcast on the telecommunication network. The further handling may be done in several different ways : creating a page on videotex that can be consulted by calling a computer server, or a spoken message by vocal restitution or synthesis, or of course a written document being delivered by fax. These different techniques are simultaneously available by means of a single plurimedia server.

At the present time these are already operational and constitute efficient tools which may easily be integrated in a communication scheme.

INTRODUCTION

La prévision des avalanches est une vieille préoccupation dans les régions de montagne. Après des siècles de dictons locaux, le premier réseau de stations d'observations nivo-météorologiques, témoignant d'une volonté de prévention rationnelle, apparaît en Suisse dès les années 50. Depuis lors, les équipes de recherche de tous les pays concernés par le phénomène n'ont pas ménagé leurs efforts pour tenter de le comprendre et apprendre à le prévoir. Ainsi, plusieurs centaines d'années-homme de travail ont certainement été investies pour permettre la rédaction de ces quelques lignes quotidiennes qui composent le bulletin avalanche d'aujourd'hui...

Mais si l'analyse mobilise une telle énergie, il n'en est pas de même en ce qui concerne sa formulation et sa diffusion. La principale réflexion formelle qui ait été menée dans ces directions a surtout concerné le choix et la normalisation de certains termes techniques (Föhn, 1985, Meister, 1994, Pahaut, 1993). Force est de constater que le contenu du bulletin avalanche prime toujours de très loin sur sa forme, qui pourtant conditionne directement son impact. Ainsi le nivologue qui dispose maintenant de modèles très sophistiqués pour l'aider dans son estimation des risques, ne peut compter que sur ses dons de journaliste pour rédiger le bulletin ! Or, il est particulièrement difficile d'écrire pour le plus grand nombre, en particulier lorsque la cible est cosmopolite, ce qui est le cas avec la clientèle actuelle de beaucoup de stations de ski. Il est également difficile d'acheminer l'information vers ses destinataires qui, comme chacun le sait, ne sont disposés qu'à fournir un effort très limité pour se la procurer.

Faciliter et automatiser la formulation et la diffusion de l'information pour une communication plus efficace ont donc été les objectifs principaux des travaux présentés dans cet article, travaux qui ont conduit à la réalisation des tout premiers outils opérationnels de Communication Assistée par Ordinateur pour une alerte au public.

1. FORMULATION DU MESSAGE

1.1. Principe

La possibilité "d'éditer" un bulletin provient du fait que l'information à transmettre est parfaitement prédéfinie. Cette affirmation s'appuie sur une analyse sémantique d'environ 200 bulletins rédigés par différents prévisionnistes du CEN*, du CDM 38* et de la SATA*, ayant

permis d'établir une taxinomie simple des divers mots et expressions composant un bulletin avalanche. Schématiquement, le bulletin apparaît ainsi comme l'arrangement de divers types de mots :

-les mots qui contiennent de l'information spécifique.

Ils sont faciles à recenser car relativement peu nombreux (quelques centaines au plus), se répétant fréquemment d'un message à un autre ; ces mots peuvent être regroupés en un nombre restreint de rubriques, qui peuvent être considérées comme autant de variables auxquelles le rédacteur affecte une valeur de son choix.

-les mots qui constituent le "mortier" d'assemblage.

Ils peuvent être très nombreux, selon l'aisance littéraire des rédacteurs.

La principe de génération du bulletin découle directement de cette représentation du message; il consiste à assembler des mots "informatifs" (choisis par le nivologue) à l'aide de groupes de mots "mortier" prédéfinis. La traduction automatique n'est autre qu'une génération utilisant des constituants équivalents d'une autre langue.

1.2. Application

L'application informatique actuelle comporte trois fonctions distinctes, chacune d'entre-elles étant assurée par des programmes indépendants. Ces fonctions sont l'édition, la post-édition et la transmission du bulletin. Les programmes correspondants sont exécutables sur PC, sous système d'exploitation MS-DOS™, à partir d'une session WINDOWS™.

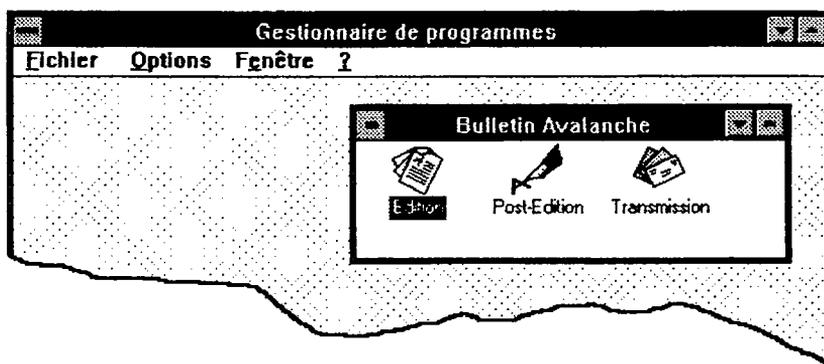


Figure 1 : Les diverses fonctions de création et diffusion du bulletin sont assurées par des programmes indépendants, exécutables depuis une session WINDOWS™.

.L'édition

Elle est assurée par le programme INFOLOG (version actuelle : 1.10) qui a été développé à l'IFENA* (Bolognesi, 1993). Ce programme permet de composer le bulletin, de le visualiser, de l'imprimer et de le sauvegarder.

La composition du bulletin s'effectue par une suite de choix proposés à l'utilisateur au moyen de menus déroulants. Le prévisionniste est ainsi invité à exprimer son analyse des risques d'avalanches indépendamment de tout formalisme linguistique, en renseignant trois catégories de rubriques concernant la portée du bulletin, son contenu et sa forme.

La portée du bulletin est fixée par :

- la date (la validité maximale d'un bulletin étant de 24 heures) : c'est la référence temporelle ;
- le domaine et le secteur géographique : c'est la référence spatiale ;

Le contenu du bulletin est défini par des choix effectués parmi six rubriques :

- le risque de déclenchement, ou plus exactement la probabilité d'occurrence des avalanches;
- la cause (principale) de l'instabilité,
- le type des éventuelles avalanches,
- l'ampleur probable des avalanches,
- les causes possibles de déclenchement,
- les zones les plus sensibles.

La forme du bulletin dépend du "style littéraire" choisi, plus ou moins alarmiste...Le nivologue peut ainsi adopter un style de rédaction correspondant au contenu du message. D'autre part, ce choix permet de varier la formulation pour éviter une lassitude possible chez le lecteur.

L'éditeur propose ainsi, pour une date et un lieu donnés, plus de 100 000 combinaisons cohérentes (le contrôle de la cohérence de l'information est assuré par l'éditeur lui-même, qui interdit environ 50 000 combinaisons incohérentes).

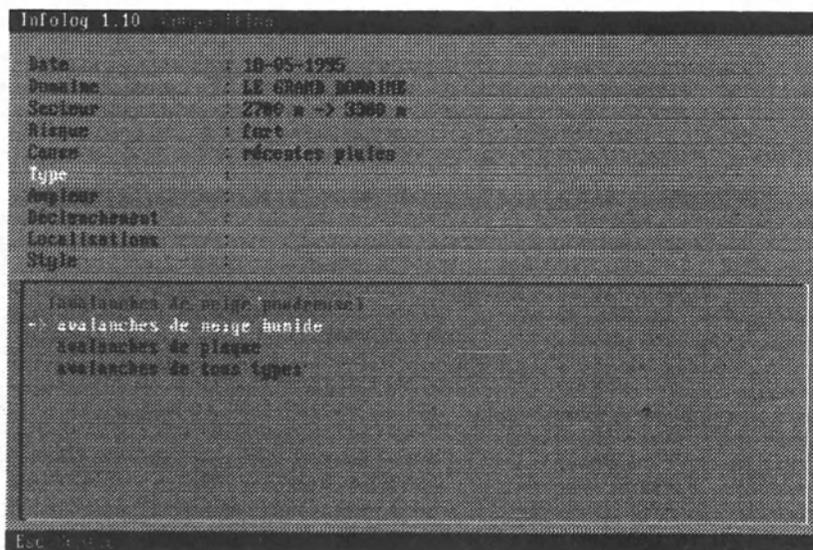


Figure 2 : A l'aide de menus déroulants, l'utilisateur construit le bulletin en renseignant chacune des rubriques constitutives de l'information (date, domaine, secteur, risque, cause, etc.). Dans cet exemple, la procédure de contrôle de cohérence du message interdit le choix "type = avalanches de neige poudreuse", incohérent avec le choix précédent, "causes = récentes pluies".

En pratique, une fois l'analyse effectuée, l'édition du bulletin réclame moins d'une minute...L'interface est elle-même disponible en 5 langues (français, anglais, allemand, italien, espagnol): la langue "de travail" est choisie par l'utilisateur au moment du lancement du programme.

A partir de ces choix, le système génère un texte présentant les caractéristiques suivantes :

- l'information est multilingue (5 langues : français, anglais, allemand, italien, espagnol).
- sa formulation permet une diffusion radiophonique et télématique, en respectant les contraintes de longueur du message imposées par ces médias.

Après visualisation permettant relecture et éventuellement correction, il est possible d'imprimer le bulletin selon une mise en page définie pour un formulaire prévu à cet effet. Celui-ci a été choisi

en concertation avec les utilisateurs du système, à l'occasion de l'une des Tables Rondes Européennes "Prévention Locale des Avalanches" organisées chaque année par l'IFENA*.

Enfin, le système propose la sauvegarde du bulletin sur disque, selon trois formats différents, le premier pour archivage, le second pour post-édition et le dernier pour transmission par modem ou via réseau numérique (INTERNET par exemple).

.La post-édition

Elle consiste à adapter la mise en page du bulletin. Elle permet de personnaliser le document qui sera diffusé, de le rendre plus attractif et donc plus efficace. Elle peut être réalisée à l'aide de n'importe quel logiciel de traitement de texte ou de PAO, et permet d'intégrer au bulletin tous types de documents complémentaires : graphiques, images, etc.



Figure 3 : exemple de bulletin en cours de post-édition. Le logiciel ici utilisé est le système de traitement de texte MICROSOFT WORD™.

Avec les logiciels "évolués", ces diverses opérations de mise en forme peuvent être automatisées par des commandes "macro", ce qui augmente la facilité et la rapidité d'utilisation.

Le bulletin peut ensuite être imprimé et distribué aux offices du tourisme, aux écoles de ski, aux bureaux des guides, etc. Il peut également être affiché aux "points information", aux bureaux d'accueil des hôtels, et en tous lieux de forte fréquentation. La figure 4 donne un exemple de bulletin local.

I	n	f	O	
LE GRAND DOMAINE 2700 m -> 3300 m			18-05-1995	
<p>BULLETIN AVALANCHE AVALANCHE BULLETIN LAWINENBULLETIN BOLLETTINO VALANGHE AVISO DE AVALANCHAS</p> <p>(F) <u>Danger!</u> Le risque d'avalanche est fort en dehors des zones sécurisées. La déstabilisation du manteau neigeux, consécutive aux récentes pluies, pourraient conduire à des déclenchements d'avalanches de neige humide d'ampleur exceptionnelle, sur les pentes de toutes expositions, par surcharge accidentelle ou rupture naturelle.</p> <p>(GB) <u>Attention!</u> The risk of avalanches outside secured zones is high. The weakening of the snowpack by the recent rains may, by accidental overload or natural fracture, on slopes of any aspect, lead to wet snow avalanches of exceptional size.</p> <p>(D) <u>Warnung!</u> Die Lawinengefahr ist ausserhalb gesicherter Zonen gross. Die Schwächung der Schneedecke durch die vergangenen Regenfälle kann insbesondere an Hängen aller Expositionen durch zufällige Überlast oder natürlichen Bruch zur Auslösung von Nassschneelawinen von ausserordentlichem Ausmass führen.</p> <p>(I) <u>Pericolo!</u> Il rischio di valanghe è forte al di fuori dalle zone controllate. L'instabilità del manto nevoso, causata da recenti piogge, potrebbe provocare distacchi di valanghe di neve umida di dimensioni eccezionali, per sovraccarico accidentale o rottura naturale, sui pendii con ogni esposizione.</p> <p>(E) <u>Peligro!</u> El riesgo de avalanchas es fuerte fuera de las zonas securizadas. La destabilización de la capa de nieve, en consecuencia de recientes lluvias, podría entrenar el desencadenamiento de avalanchas de nieve húmeda de amplitud excepcional, en las pendientes de todas las orientaciones, por sobrecarga accidental o ruptura natural.</p> <p style="text-align: right; font-size: 0.8em;">Infoiog</p>				

Figure 4 : Exemple de bulletin avalanche fictif généré par le système INFOLOG. et mis en forme en post-edition (réduction du format A4 original).

La transmission

A partir de l'ordinateur du service de sécurité, le bulletin peut être envoyé au serveur de diffusion par modem. Ce serveur distribue à son tour l'information par l'intermédiaire des réseaux de télécommunication (réseau téléphonique, INTERNET,...) sur divers terminaux : Minitel, téléphone, fax, PC, etc. (figure 5). Le bulletin, consultable 24h/24, est alors accessible à une immense clientèle (plus de 7 millions de Minitels en France !). Bien entendu, la consultation simultanée par de nombreux utilisateurs est possible, quel que soit le terminal utilisé.

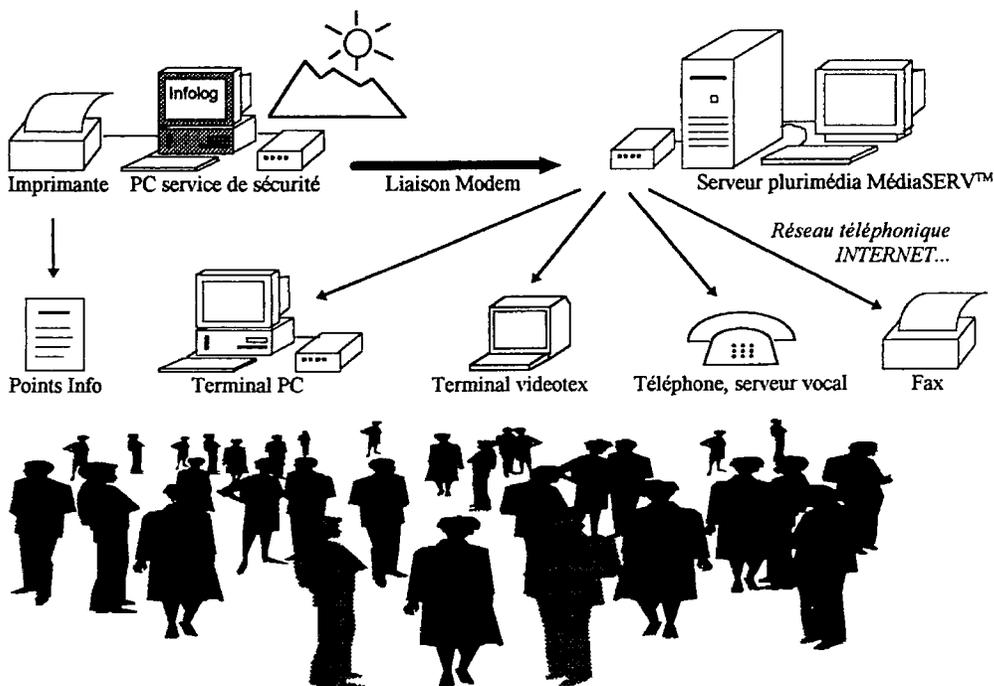


Figure 5 : schéma de diffusion du bulletin avalanche.

1.3. Validation

Comment ce bulletin est-il perçu par ses lecteurs ? Afin de répondre à cette question essentielle, une enquête a été menée auprès des professionnels de la neige (moniteurs de ski, guides, pisteurs...) et de la clientèle de six stations de ski, en France et en Suisse, au cours de l'hiver 1993-94 (sondage aléatoire simple). Au total, plus de 500 personnes ont été interrogées. Les résultats de cette enquête sont résumés dans le tableau suivant (figure 6).

QUESTION	INTERLOCUTEURS	OUI	NON	?
Message compréhensible ?	Professionnels	96%	0%	4%
	Amateurs	100%	0%	0%
Information suffisante ?	Professionnels	63%	33%	4%
	Amateurs	64%	30%	6%
Message mémorable ?	Professionnels	96%	4%	0%
	Amateurs	83%	14%	3%
Message retransmissible ?	Professionnels	90%	6%	4%
	Amateurs	86%	9%	5%

Figure 6 : Résultats d'une enquête réalisée auprès de 500 lecteurs du bulletin automatique dans 6 stations de ski en France et en Suisse.

A l'issue de cette enquête, il semble que le bulletin automatique apporte une information d'une qualité acceptable...

2.CONDITIONNEMENT DU BULLETIN

2.1.La page télématique

Le bulletin avalanche est mis au format Vidéotex afin d'en permettre la consultation depuis un terminal de type Minitel ou un micro-ordinateur équipé d'un modem. Ce travail de conversion du bulletin à la norme vidéotex est réalisé par le serveur d'information MédiaSERV™ dont le rôle est triple :

- recevoir et préparer le document à diffuser en le mettant au format du terminal considéré.
- assister l'utilisateur dans sa recherche d'information.
- effectuer une gestion plurimédia/multi-utilisateur, pour rendre accessible le bulletin simultanément à l'ensemble des utilisateurs, quel que soit le terminal utilisé.



Figure 7 : Exemple d'un bulletin avalanche au format Vidéotex destiné aux Minitels et émulateurs Minitels sur micro-ordinateur de type PC ou Macintosh (copie d'écran Minitel).

2.2.La voix numérique

Le système produit automatiquement un bulletin parlé. L'intérêt provient essentiellement de l'importance du parc de téléphones raccordés (le téléphone reste actuellement un appareil de communication des plus communs et des plus répandus !).

Il existe deux techniques permettant la génération automatique du message vocal :

-la reconstitution vocale. Cette méthode nécessite l'enregistrement de l'ensemble des expressions primitives (suite de mots) utilisé par le module de génération du bulletin. Elle ne permet pas de s'écarter des messages initialement prévus, mais offre en revanche la meilleure qualité sonore.

- la synthèse vocale. Cette technique permet de traduire un fichier texte quelconque en un message sonore. On utilise ici le procédé PSOLA™ qui a été développé par le CNET* et qui utilise les phonèmes. La qualité auditive du message généré est moins bonne que celle obtenue à l'aide de la technique précédente, mais la souplesse du système est supérieure dans la mesure où n'importe quel texte peut être transformé en un message parlé. C'est la raison du choix de cette méthode pour générer le bulletin vocal automatique.

CONCLUSION

La formulation d'un bulletin est une tâche difficile et d'autant plus délicate que le bulletin constitue un maillon important du dispositif de prévention des risques d'avalanches. Un système de "Communication Assistée par Ordinateur" permet de fiabiliser et d'optimiser cette tâche. Il permet en effet de standardiser l'information, aussi bien sur le fond que sur la forme, et de réaliser une traduction de haute qualité, capable notamment de traiter les expressions idiomatiques. D'autre part, un tel système permet d'utiliser tous les médias actuels en y accédant par ces fameuses "autoroutes de l'information" qui commencent à sillonner nos paysages. Aujourd'hui, la démonstration est faite qu'il est possible de réaliser un système de rédaction automatique multilingue permettant de diffuser l'information en temps réel à une multitude de correspondants. Ce système a été appliqué au niveau local. Pour un bulletin régional, il est nécessaire d'enrichir l'information. Un prototype a d'ores et déjà été réalisé et mis à disposition du "Lawinenwarndienst" de l'IFENA afin d'être testé. Il appartient maintenant aux prévisionnistes et aux lecteurs de se prononcer sur l'intérêt de tels systèmes, et d'en décider l'avenir...

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anonyme, 1994 - Le temps change vite en montagne. *Brochure Météo-France* réalisée avec le concours de la Direction de la Sécurité Civile et du Club Alpin Français.
- Bolognesi (R.), 1993 - Un éditeur de bulletin avalanche multilingue. *Neige et Avalanches*, n°61, mars, pp.18-20.
- Föhn (P.), 1985 - Le bulletin suisse des avalanches. *Les Alpes*, bulletin mensuel du Club Alpin Suisse, n°10, p.414-420.
- Meister (R.), 1994 - *Guide d'interprétation du bulletin d'avalanches publié par l'Institut Fédéral pour l'Etude de la Neige et des Avalanches Weissfluhjoch/Davos*. Communication de l'IFENA n°50, Davos, 27 p.
- Pahaut (E.), 1993 - Echelle européenne. *Neige et Avalanches*, n°63, septembre, pp.2-8.

Remerciements à Christina Baltazar, Jean-Marc Daultier (SATA Alpe d'Huez), Othmar Buser, Paul Föhn, Martin Meyer-Grass (IFENA Davos), Renato Cresta (Scuola Sci Macugnaga), Armand Dussex (Anzère), Fabrice Meyer (Tel Aminona SA) et Joan Manuel Vilaplana (Universitat Barcelona) pour leur collaboration.

(*)

CEN : Centre d'Etude de la Neige

CDM38 : Centre Départemental de la Météorologie - Isère

CNET : Centre National d'Etudes des Télécommunications

IFENA : Institut Fédéral pour l'Etude de la Neige et des Avalanches

SATA : Société pour l'Aménagement Touristique de l'Alpe d'Huez

Prévision locale du risque d'avalanches à La Plagne

C. Schneider¹

RESUME

La prévision locale du risque d'avalanches à La Plagne débute en 1978 et se développe rapidement. Sur le terrain, on utilise les moyens classiques tels que les observations nivo-météorologiques, sondages par battage, observations de l'activité avalancheuse mais on utilise aussi et de plus en plus les techniques informatiques qui sont une aide précieuse pour le stockage des paramètres, la gestion des données et qui sont une mémoire et une aide importante pour le prévisionniste. Elles permettent également de véhiculer et de diffuser au mieux l'information relative aux risques d'avalanches.

SUMMARY

Local avalanche risk forecasting began in La Plagne in 1978 and developed rapidly. The methods used on site are the classical ones such as weather observation, snow sounding and observation of avalanche activity but computer technics are being used more and more for compiling the different data and these management which in turn are a precious asset to the forecaster. In this way it also help for better diffusion of the relative avalanche risk information.

INTRODUCTION

Dès 1971, La Plagne adhère au réseau d'observation nivo-météorologique mis en place par Météo-France avec l'installation du poste de Plagne Centre (1970 m, versant Nord-Est).

Mais c'est en 1978 que commence véritablement la Prévision Locale du Risque d'Avalanches avec l'ouverture du massif des glaciers de Bellecôte (domaine skiable d'altitude 3250 m). La prévision locale s'est avérée nécessaire du fait de l'étendue et de la diversité du domaine exploité tant en altitudes qu'en orientations. En effet, La Plagne est une des "rares" stations à exploiter les 4 versants d'un massif et à des altitudes s'étageant de 1200 à 3250 m.

Par la volonté du directeur du Service des Pistes, Mr MARTZOLF, cette prévision locale se développe assez rapidement et débute par la création d'un poste de prévisionniste à temps complet.

Très rapidement également, Mr MARTZOLF prend conscience de l'importance des recherches sur le matériau neige ainsi que de la nécessité de l'informatisation dans ce domaine. Il s'ensuit une étroite collaboration avec le Centre d'Etude de la Neige pour déboucher sur des réalisations concrètes comme le modèle par analogie (développé par le CEN) qui maintenant s'appelle ASTRAL (Analogie STatistique pour le Risque d'Avalanches Local).

¹ Service des Pistes et de la Sécurité de La Plagne, BP 18, 73210 La Plagne - FRANCE -
tel. 79.09.01.80 fax 79.09.08.85

MOYENS MIS EN OEUVRE POUR REALISER LA PREVISION LOCALE DU RISQUE D'AVALANCHE.

Dans la pratique, la prévision repose sur les observations nivo-météorologiques, les sondages par battage, la prévision météorologique, l'observation de l'activité avalancheuse, une bonne connaissance et expérience du terrain et des phénomènes nivologiques du domaine ainsi que sur plusieurs logiciels informatiques.

La qualité de la prévision locale dépend bien évidemment de la qualité des mesures mais aussi de la diversité des points de mesure. C'est pourquoi nous avons développé un petit réseau de postes d'observations qui couvre l'ensemble des 10 000 hectares du domaine skiable. Ceci est également vrai pour les sondages par battage où, là aussi, la diversité des points de mesure est essentielle. Nous disposons donc de 4 postes d'observations auxquels sont associés autant de sites de sondages :

-Plagne Centre, 2 observations par jour à 1970 m d'altitude en versant Nord-Est, sondage même orientation 2160 m d'altitude.

-Champagny, 2 observations par jour à 1950 m d'altitude en versant Sud, sondage même orientation 2300 m d'altitude.

-Secteur du glacier, 1 observation par jour à 3000 m en versant Ouest, sondage même orientation 2990 m d'altitude.

-Montchavin, observation climatologique 1 fois par jour à 1680 m en versant Nord, sondage même orientation 2100 m d'altitude.

Les sondages réguliers sont étoffés de sondages ponctuels suivant les besoins et surtout en fonction de la situation nivologique d'un point donné (risques particuliers, bâtiments, routes etc...).

L'observation de l'activité avalancheuse est un facteur très important pour la prévision des risques.

L'ensemble des couloirs et versants avalancheux (plus de 200 à La Plagne) est codifié et numéroté et lors de chaque déclenchement qu'il soit artificiel, accidentel ou naturel un certain nombre de paramètres sont relevés tels que :

jour et heure du déclenchement, type du déclenchement (artificiel, naturel, accidentel, à skis) le nombre de tirs pour les déclenchements artificiels ainsi que la quantité d'explosifs, l'épaisseur de la cassure, la largeur de l'avalanche, la zone de départ et de dépôt, éventuellement le type d'écoulement.

Cette observation réalisée par l'ensemble du personnel du service des pistes est très importante et centralisée par le prévisionniste. Elle permet la prise de mesures immédiates en fonction de l'activité observée mais aussi une meilleure analyse du manteau neigeux.

D'autres moyens complémentaires sont utilisés, notamment une balise automatique de mesure du vent (située à 2500 m et reliée à l'ordinateur) et une balise nivose installée au pied du glacier par le Centre d'Etude de la Neige et interrogeable par minitel. Ces 2 balises permettent d'obtenir des informations importantes sur le vent (force et direction), informations indispensables à la prévision des risques d'avalanches.

Toutes ces observations et ces relevés qui nous servent ponctuellement au moment présent sont également d'une très grande importance a posteriori d'où l'intérêt de disposer d'un certain nombre de logiciels pour les stocker, les gérer et les utiliser à bon escient.

Actuellement nous utilisons 3 logiciels : les 2 premiers sont développés et fournis par METEO FRANCE et le troisième a été écrit par un informaticien (Matthieu GILLET).

GELINIV : GEstion Locale de l'Information NIVologique.

gère l'ensemble des observations nivo-météorologiques ainsi que les sondages et permet l'édition de statistiques diverses (hauteurs de neige, températures...) des sorties graphiques de sondages et des différents paramètres (températures, précipitations...).

Pour le poste de Plagne Centre, les observations nivo-météorologiques sont stockées depuis la saison 1970/71.

ASTRAL : Analogie STATistique pour le Risque d'Avalanches Local.

Ce modèle statistique permet à partir des observations nivo-météorologiques du matin (8h) de rechercher parmi les journées du passé celles qui se rapprochent le plus au sens nivo-météo de la journée en cours. Ensuite, il s'agit de prendre en compte l'activité avalancheuse observée pour ces journées analogues pour aider à prévoir celle de la journée à venir.

Le modèle dispose actuellement de 1900 journées en mémoire (depuis 1980/81).

Il permet également depuis 1994/95 d'effectuer des simulations sur des situations à venir en fonction des prévisions de chutes de neige et permet donc d'anticiper un certain nombre de décisions.

OASIS : Observation des Avalanches du Site et Interrogations Statistiques.

Il permet le stockage et la gestion de toutes les avalanches observées sur le domaine ainsi que de nombreuses sorties statistiques.

Le couplage avec ASTRAL permet de visualiser les avalanches des journées analogues et ainsi de connaître notamment leur ampleur et leur caractéristiques techniques.

Le prévisionniste a donc en charge la réalisation d'un certain nombre de sondages, l'exploitation du poste d'observation principal (Plagne Centre), la concentration et le contrôle de toutes les autres observations, l'exploitation de toutes ces données ainsi que la diffusion de l'information concernant la prévision. Il est également en liaison constante avec le directeur des pistes pour les décisions d'ouvertures et de fermetures des pistes et des remontées mécaniques en fonction des risques d'avalanches.

MOYENS DE DIFFUSION DE LA PREVISION.

Après analyse de toutes les données, le prévisionniste peut donner un indice des risques et rédiger un bulletin quotidien de prévision locale qui va accompagner cet indice. Celui-ci pourra le cas échéant être modifié en cours de journée suivant l'évolution nivologique. L'indice des risques est affiché au sommet des principales remontées mécaniques du domaine et le bulletin dans chacune des stations.

Le prévisionniste a également en charge la rédaction d'une analyse hebdomadaire de la situation nivologique transmise à plus de 50 destinataires, accompagnée ou non, en fonction de sa destination, des graphiques des différents sondages de battage.

COUT DE LA PREVISION.

Ce travail mobilise du personnel cinq à huit mois par an, des instruments de mesure en partie fournis par la Protection Civile mais qui nécessitent des achats complémentaires, du matériel informatique performant pour le traitement des mesures et l'emploi des logiciels et représente un coût pour le service qui veut gérer au mieux le risque d'avalanche et la sécurité du domaine skiable.

Ce "plus" que représente la prévision locale est de l'ordre de plus de F. 200 000 par an, soit, 1% du budget total du fonctionnement du service des pistes de La Plagne.

- Le prévisionniste employé 8 mois par an, les 3 observateurs nivo-météo nécessaire pour la gestion du réseau d'observations quotidiennes du matin et de l'après-midi, les sondages par battage et relevés des profils stratigraphiques hebdomadaires, représentent une dépense en charge de main d'oeuvre de : F. 180 000

- Le matériel informatique, avec une obligation d'amélioration constante donc une rotation rapide du matériel, est une charge annuelle de : F. 15 000

- Fournitures diverses de photocopies, de téléphone, fax etc... F. 10 000

- Amortissement annuel de la balise automatique des mesures météo de la Grande

Rochette : F. 12 000

Coût total annuel : F. 217 000

Le coût est important certes, mais, si l'on veut se doter d'outils performants pour essayer de gérer au mieux les risques d'avalanches d'un domaine skiable, il nous paraît nécessaire de faire l'effort financier et technique que cela représente sans toutefois être certain d'avoir des résultats à 100 %. Néanmoins, cela permet aussi d'avancer dans la connaissance et de stocker des données pour l'avenir en espérant que, plus tard, cela serve aux techniciens et scientifiques qui vont de toute façon vers un progrès certain dans ce domaine.

CONCLUSIONS

La prévision locale est indispensable pour gérer la sécurité et le fonctionnement d'un grand domaine. De plus, les outils informatiques associés à cette prévision sont une aide supplémentaire à la décision dans les périodes de crise (forte chutes de neige, fort risque d'avalanches...) par les informations (journées analogues, statistiques diverses) qu'ils peuvent fournir notamment aux différentes commissions communales de sécurité.

Les applications et les apports de la recherche scientifique à la prévision locale sont nombreux et nous en avons évoqué quelques uns. En tant que prévisionniste de terrain, j'espère que la science pourra encore nous aider car bon nombre de phénomènes et de paramètres (transport de neige par le vent, eau de fonte dans le manteau neigeux ...) ne sont pas encore totalement voire pas du tout exploités dans des systèmes informatiques utilisables à notre niveau. Cela nous permettrait d'affiner encore plus nos prévisions et les rendre plus fiables, mais attention, il ne faudra jamais oublier que la nivologie n'est et ne sera jamais une science exacte et sachons rester modeste devant les éléments et les événements naturels.

Spatial and time variability of avalanche predictors and accuracy of their estimations

La variabilité spatiale et temporelle des prédicteurs des avalanches et précision de leur estimation

P. Chernouss¹

RÉSUMÉ

Pour apprécier la variabilité spatiale et temporelle des prédicteurs des avalanches on utilise une analyse corrélative. Comme prédicteurs on envisage l'épaisseur et la densité de la neige la résistance au déplacement et l'intensité du transport de la neige en tempête.

ABSTRACT

Correlation analysis is used for estimation of spatial and time variability of avalanche predictors. Snow thickness and density, shear strength and intensity of snow drift are examined as predictors.

INTRODUCTION

Since reliability of any forecast depends on accuracy of predictors, it is interesting to estimate this accuracy. So long as measurements of predictors are done in separate points of space or time moments and measured quantities are changing in space and time, it is important to know the representativeness of the data obtained. Information on spatial variability of total snow thickness, thickness of fresh snow², shear strength and density of fresh snow in the Khibini avalanche sites (starting zones) and time variability of snow drift intensity on the Khibini mountain plateau is presented in the paper. The work is aimed to answer the following questions: "how to interpret data of measurements in separate points (moments of time) for forecast purposes?", "what measuring network is required for supplying forecast models with reliable input data?"

METHOD

The field of each parameter is considered as stochastic. The valuations of mathematical expectations m , dispersions σ^2 , autocorrelation functions $r(l)$ are used as characteristics of statistical structure of the fields.

¹ Anti-avalanche service of JS "Apatit",
50 years of October st. 33a, Kirovsk, Murmansk region,
184230, Russia Tel 7-815-31-9623, Fax +4778914124,
Telex 126161 chorr su,
E-mail (InterNet) master@apatit.murmansk.su

² There were no cases of fresh snow which was formed without snowstorm.

Requirements for the network (measurements) are the following:

the mean square error of interpolation at any point of field should not be more than the preset value;

the error of substitution of the mean integral by the mean arithmetical from separate measurements should not be more than the preset value;

the error of substitution of the mathematical expectation by the mean arithmetical from separate measurements should not be more than the preset value;

In the work the relative mean square errors of linear interpolation into the middle of the line segment between measurement points - $\varepsilon=E/\sigma$ were calculated [1], where E is the absolute mean square error of interpolation. The relative errors of substitution of the mean integral by the mean arithmetical $\gamma=F/\sigma$ were calculated for the case when the whole surface was divided into equal squares with measurements in their centers [2], where F is the absolute mean square error of substitution. The relative errors of substitution of the mathematical expectation by the mean arithmetical $\alpha=P/\sigma$ were calculated for the case when measurements were made in equidistant points on the line segment [3], where P is absolute mean square error of substitution.

Mentioned errors are defined entirely by the parameters of statistical structure of the fields, by plan of measurements and measurements accuracy [1,2,3].

SNOW THICKNESS

The characteristics of snow thickness spatial statistical structure were obtained by treatment of more than ten thousand snow height measurements in different slopes with inclination from 17° to 35°. Measurements were carried out by a stick in profiles with intervals 1m and 5m. The part of the profiles was directed along the contour lines and the other part - along the slope gradient line. For the total snow thickness the mean thickness in profiles was changed from 0.1m to 1.5m, and that for the thickness of fresh snow from 0.04m to 0.23m. For the total snow thickness the values σ_h increase with the mean snow thickness m_H , but for $m_H=0.5m$ and more they remain constant and are equal to 0.3-0.4m. The dependence between m_h and σ_h is absent. The values σ_h in different profiles were varied from 0.04m to 0.16m. The valuations of the autocorrelation functions for the total snow thickness and for the thickness of fresh snow are similar.

$$R_H(l)=\exp(-0.22l^{0.67}) \quad (1)$$

$$r_h(l)=\exp(-0.34l^{0.65}) \quad (2)$$

Functions ε were obtained with the data of spatial statistical structure. The example of such functions for the total snow thickness is presented in Fig1.

The calculations show that it is practically impossible to create the measurement network which gives errors of interpolation essentially less than σ . For the accuracy of interpolation would be equal to the accuracy of measurements, the distance between measurement points in the Khibini Mountains should be about 1.5m. The functions γ and α for substitution of the mean integral and the mathematical expectation by the mean arithmetical were obtained and tabulated [6]. As calculations show, the

network for the fresh snow thickness measurement should be 10-25 times more thicker than that for the total snow thickness to achieve equal relative errors $E_h/m_h = E_H/m_H$.

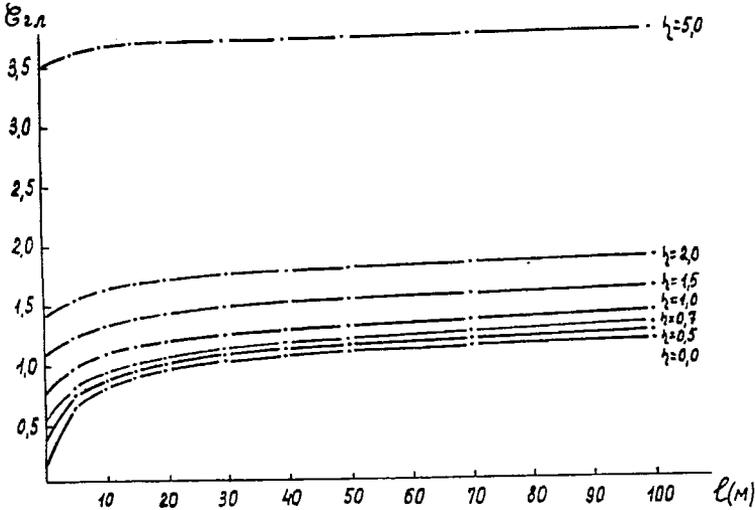


Fig. 1. Relative error of linear interpolation at the middle of segment ϵ in relation to the distance between reference points l and the value of the error in measurements η ($\eta = \Delta/\sigma_H$) for the snow cover thickness field autocorrelation function (1). Δ - absolute mean square error of measurements.

SNOW DENSITY

Snow density was measured for fresh snow only in profiles similar to those for the total snow thickness, with intervals from 0.3m to 1m. The total number of measurements is about 2 thousand. The mean density in different series was changed from 0.18g/cm^3 to 0.27g/cm^3 and coefficients of variation from 0.05 to 0.17. The dependence between the mean density and standard deviation is not found. The valuation of the autocorrelation function of density is

$$r_q(l) = \exp(-0.43|l|^{0.50}) \quad (3)$$

The relative errors of linear interpolation for density ϵ_p are almost the same as for the thickness of fresh snow ϵ_h (differencies not more than 7%). When density and thickness of fresh snow are measured at the same points, relative error for density in F_p/m_p is 6-50 times less than for the snow thickness.

It is possible to get relative error $P_p/m_p = 0.1$ with 4-5 measurements in profile length 50-100m. long.

SHEAR STRENGTH

Shear strength was measured for fresh snow only in profiles like for snow thickness and density with interval equal to 1m. Measurements were carried out with shear frame 10*10 cm and dynamometer. The total number of measurements is more than 1 thousand. The mean shear strength in different series was changed from 2 g/cm² to 31 g/cm², standard deviations from 0.8 g/cm² to 7.0 g/cm² and coefficients of variation from 0.06 to 0.86.

The valuation of the shear strength autocorrelation function is

$$r_c(t) = \exp(-0.371^{0.64}) \quad (4)$$

Statistical bonds between the shear strength values drop sharply with the distance for the Khibini Mountains. Comparison with Tien Shan is given on Fig.2.

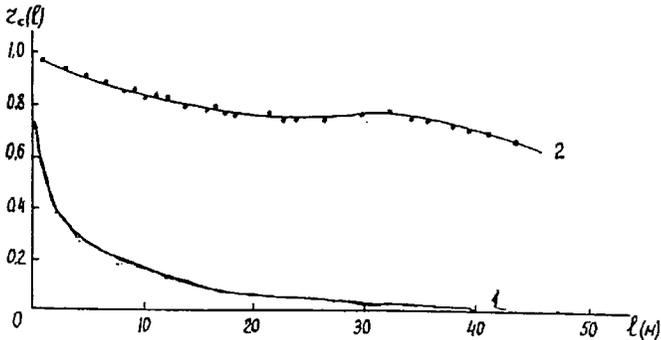


Fig. 2. Spatial autocorrelation function of fresh snow shear strength: 1- for the Khibini Mountains, 2 - for Tien Shan

INTENSITY OF SNOW DRIFT

The time variability was investigated only. Measurements were carried out on the mountain plateau with CPZ-1 devices [5].

The characteristics of time variability were obtained by processing of more than 5000 continuous measurements in a 2cm layer above the snow surface during five snowstorms. Each measurement gives the mean intensity for 1 or 2 minutes.

The mean (for 5 snowstorms) autocorrelation function was approximated by (5)

$$r_q(t) = \exp(-0.025t) \quad (5)$$

Where t is time in minutes.

Functions of errors γ_q of the mean integral intensity are presented in Fig.3.

This functions can also be interpreted as relative errors of mean integral intensity for the case when $C_v=1$. It is possible to choose the acceptable accuracy by changing the time interval between measurements. Now the time interval between routine measurements in the Khibini Mountains is 1 hour [4] (before this investigation it was 3 hours).

CONCLUSIONS

Charging from the spatial and time distribution of avalanche predictors like stochastic fields (or processes), it is possible to choose a plan of measurements for getting the reliable input data for the forecast models.

The most changeable characteristic (in space) is snow thickness, the next are shear strength and density.

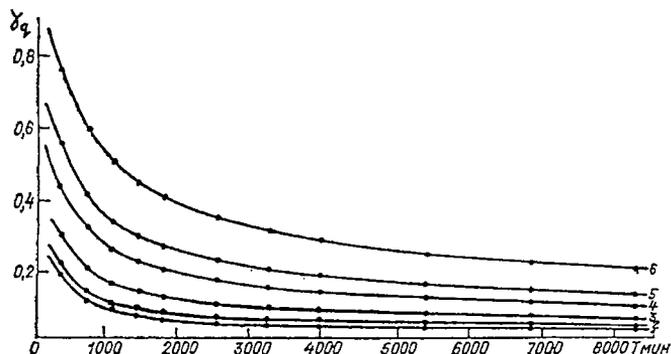


Fig. 3. Relative error of snow drift mean integral intensity γ_q in relation to time smoothing period and intervals between measurements δt , for the process with autocorrelation function (5).

1 - $\delta t=20$ min, 2 - $\delta t=30$ min, 3 - $\delta t=60$ min, 4 - $\delta t=120$ min, 5 - $\delta t=180$ min, 6 - $\delta t=360$ min.

Time and spatial variability of avalanche predictors is a function of physico-geographical conditions. Supplying of snow stability models with data of specified accuracy require different measuring networks in different geographical regions.

For regions with intensive snow drift the spatial interpolation of snow parameters is senseless, but there is a real possibility to determine the reliable mean values of the parameters. In accordance with this the use of the mean values in probabilistic forecast models is preferable.

REFERENCES

1. Дроздов О.А., Шепелевский А.А., 1946 - Теория интерполяции в стохастическом поле метеорологических элементов и ее применение к вопросам метеорологических карт и рационализации сети. - Тр.НИУ ГУГМС, сер.1, вып.13, с.65-115.
2. Каган Р.Л., 1965 - О точности определения средней по площади по данным точечных измерений. - Тр.ГГО, вып.175, с.117-131.
3. Лайхтман Д.Л., Каган Р.Л., 1960 - Некоторые вопросы рационализации снегоъемок. - Тр.ГГО, вып.108, с.3-18.
4. Чежоус П.А., 1989 - Точность определения метелевого переноса и качество диагностики лавинной опасности. - В сб. Труды третьего всесоюзного совещания по лавинам. Ленинград, Гидрометеиздат, с.101-111.
5. Чежоус П.А., Зюзин Ю.Л., Бобрышев А.В., 1989 - Метелемеры ЦПЗ и результаты их испытаний. - В сб. Труды третьего всесоюз-

ного совещания по лавинам. Ленинград, Гидрометеиздат, с.95-101.

6. Черноус П.А., Христов Ю.В., 1986 - Оценка точности данных о толщине снега в лавиносборах. - Материалы гляциологических исследований, вып.55, с.201-206.

Concept suisse pour la prévision du danger d'avalanches

W.J. Ammann¹

RÉSUMÉ

La prévision du danger d'avalanches a pour but la prévention de toutes sortes d'accidents, soit des accidents hors pistes, soit des accidents dus à des avalanches atteignant des stations de ski, des villages, des routes ou des lignes de chemin de fer.

Pour améliorer la prévision du danger d'avalanches, il est non seulement nécessaire d'intégrer dans la pratique les derniers résultats de la recherche mais aussi de nouveaux moyens de communication, des mesures automatiques de différents paramètres de la couche de neige ou de nouvelles méthodes d'exploitation des données de base. En outre il s'agit d'exploiter au mieux les moyens modernes de diffusion.

ABSTRACT

The main reason to do avalanche warning is to prevent any kind of accident which may cause damage to people and goods.

To improve the avalanche warning in Switzerland it is not only necessary to continuously implement research findings into the operational daily warning work but also to continuously measure on-sight the various parameters of the snow cover and to use new evaluation and decision making techniques. This effort is only successful if the modern communication and diffusion techniques are used.

SITUATION DE DÉPART EN SUISSE

En l'état actuel, les 5 prévisionnistes du Service d'alerte d'avalanches de l'IFENA rédigent environ 110 bulletins d'avalanches par hiver, c'est à dire chaque vendredi et après chaque changement de situation nivologique ou avalancheuse. Le bulletin est valable pour toute la Suisse avec ses différentes régions climatologiques et couvre les aspects touristiques ainsi que les aspects de sécurité des villages, routes, etc. Le bulletin décrit la situation actuelle et n'est donc pas un bulletin de prévision bien qu'il contienne un chapitre "tendance" à la fin.

Le bulletin est basé sur l'information journalière de 77 stations d'observation manuelle et d'une vingtaine de stations automatiques. Grâce à la nouvelle loi Suisse sur la forêt du 4 octobre 1991, les stations automatiques sont subventionnées par la confédération.

¹Chef de l'Institut fédéral Suisse pour l'étude de la neige et des avalanches, IFENA, Flüelastr. 11, CH-7260 Weissfluhjoch/Davos, Tél. ++41 81 417 02 31 / Fax ++41 81 417 01 10

CONCEPT DES 3 NIVEAUX

Pour améliorer la précision et l'actualité du bulletin, l'IFENA prévoit un nouveau concept. Ce concept des 3 niveaux doit couvrir aussi bien les besoins d'une prévision nationale que régionale et locale. La base d'information sera donnée par un réseau d'environ 100 stations automatiques et d'une centaine de stations d'observateurs qui seront reliées directement à l'IFENA et aux centres régionaux. Les trois niveaux d'abstraction sont représentés par la fig. 1, le principe de communication par la fig. 2 et une configuration typique du réseau de communication par la fig. 3.

COMPÉTENCES ET TÂCHES DES 3 NIVEAUX DU RÉSEAU SUISSE

Niveau national

Le niveau national est représenté par l'IFENA qui coordonne tous les niveaux et qui est responsable des bulletins national et régionaux. L'IFENA est aussi responsable de l'acquisition des données, du contrôle de qualité des données, de l'archivage des données à long terme et de la mise à disposition des données à tous les intéressés. La diffusion de nouveaux outils informatiques pour l'évaluation et la représentation des données et de programmes d'aide à la décision sera aussi assurée par l'IFENA en utilisant le réseau de communication (fig. 2). Le bulletin de prévision et des informations sur la situation nivologique seront diffusés par radio, télévision, journaux, fax et autres réseaux électroniques.

Niveau régional

Les stations régionales sont responsables de la collection des données locales et de leur mise à disposition, de la maintenance des stations automatiques et du support au niveau local. Les régions ne rédigent le bulletin qu'en cas de situations catastrophiques tandis que le bulletin régional journalier sera rédigé par l'IFENA. Les bulletins régionales formeront la base pour le bulletin national. Ils contiendront aussi des informations sur le temps actuel, sur l'évolution du manteau neigeux et la répartition des hauteurs de neige. Si possible, l'information sera présentée sous forme graphique.

Niveau local

Le niveau local est responsable des stations manuelles et automatiques. La prévision locale doit fournir la base de décision pour fermer ou ouvrir des routes ou des pistes de ski, pour évacuer des maisons, etc.. Elle doit aussi fournir des informations pour des personnes hors pistes, de la randonnée à ski etc.

Traitement des données

Le traitement des données au niveau local sera implanté sous MS-DOS/Windows tandis qu'au niveau régional et national il est prévu d'utiliser le système UNIX (fig. 4). Différents programmes de communication assureront l'échange de données. Les utilisateurs extérieurs comme p.ex. les guides de montagne auront accès aux données par une data-box.

TYPES DE STATIONS AUTOMATIQUES

L'amélioration de la prévision du danger d'avalanches aux trois niveaux ne sera possible que par la construction d'un réseau de stations automatiques réparties sur toutes les Alpes suisses. Deux types sont à distinguer: les stations d'indice et les stations d'alerte.

Station d'indice

Les stations d'indice représentent la situation météorologique et nivologique typique pour une surface de 100 - 300 km². Elles sont situées à une altitude d'environ 2000 - 3500 m s.m. Leurs données sont nécessaires pour l'évaluation journalière de la situation avalancheuse. Les stations consistent en une station météo située sur une crête (mesure de la vitesse et de la direction du vent ainsi que de la température de l'air, etc.) et d'une station nivologique située sur un champ de neige plat et représentatif (mesure de la hauteur de neige, des températures du manteau neigeux, du sol et de l'air, etc).

Station d'alerte

Les stations d'alerte permettront l'évaluation de la situation locale. Leur représentativité est limitée à quelques km², mais elles sont capables de fournir des informations précises quant au danger auquel sont exposés p.ex. un tronçon de route ou certains bâtiments. Elles seront situées dans des couloirs d'avalanches. Les mesures météorologiques et nivologiques peuvent être complétées par des mesures de contrôle d'activité d'avalanches ou même par la possibilité d'alerte automatique en cas critique.

CONCLUSION

Un système d'une centaine de stations automatiques et un réseau d'observateurs reliés par modem avec l'IFENA garantit la modernisation de la prévision du danger d'avalanches en Suisse en combinaison avec une amélioration des différentes aides à la décision et une intégration des moyens modernes de représentation et de diffusion des données et des résultats.

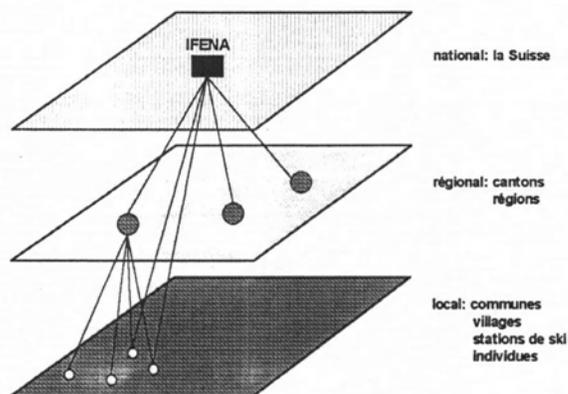


Fig. 1 Les 3 niveaux d'abstraction

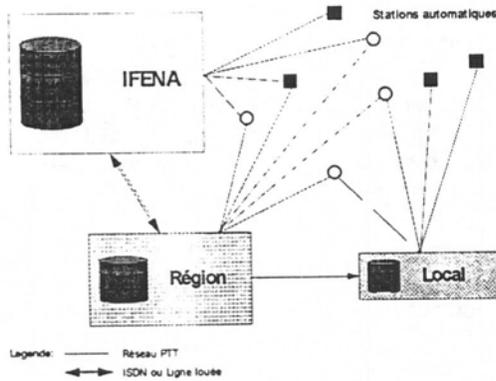


Fig. 2 Principe de communication

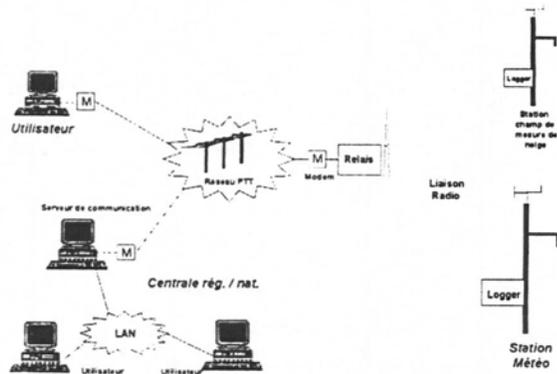


Fig. 3 Configuration typique du réseau de communication

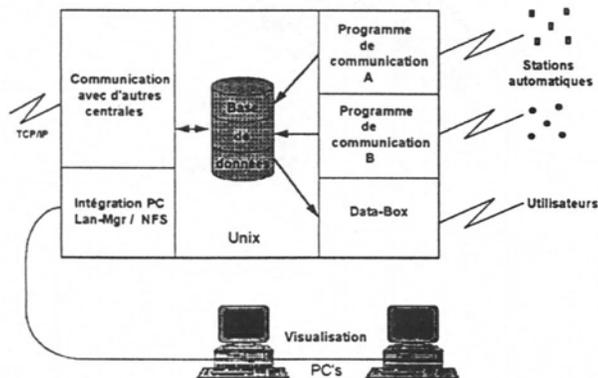


Fig. 4 Traitement des données au niveau régional/national

Avalanche activity during major avalanche events, a case study for hydroelectric reservoirs - *Activité avalancheuse majeure : étude du cas des barrages hydro-électriques*

M. Schaer¹

RÉSUMÉ

Dans les Alpes il y a beaucoup de lacs de retenue qui sont menacés par des avalanches. Si un bassin est plein, cela peut provoquer des inondations dues au déplacement de l'eau ou à des raz de marée. Il est alors nécessaire d'avoir un franc-bord. Pour le calcul de ce franc-bord, il faut connaître la grandeur ainsi que le nombre des avalanches qui peuvent atteindre le plan d'eau pendant une période avalancheuse.

Comme il n'existe point de données suffisantes sur les avalanches pour un site de retenue, nous avons décidé d'examiner une vallée où on connaît bien les avalanches depuis longtemps. C'est la vallée d'Urseren dans le canton d'Uri. On a comparé le nombre de trajectoires d'avalanche potentielles au nombre d'avalanches observées pendant des périodes avalancheuses de grand envergure.

De là, il est possible de calculer la probabilité de déclenchement pour différentes périodes de retour. Sur la base de ces données, l'on peut déterminer le volume total des avalanches à prendre en compte en cas de catastrophe.

ABSTRACT

Many reservoirs in the Alps are threatened by avalanches. The water displacement and the surge by the avalanche mass may cause overflow of a full basin. To prevent this, a sufficient freeboard has to be kept. To calculate the necessary height of this freeboard, it is essential to know not only the size, but also the number of avalanches that can reach the reservoir during an avalanche period.

In lack of measurements at reservoir sites, we studied another valley from where fairly precise records are available, the Urseren valley in the Canton of Uri.

A comparison of the total area of potential avalanche departure zones and the number of avalanches observed during some catastrophic avalanche periods was carried out. By this, we could calculate avalanche activity for different return periods. This can serve to forecast possible avalanche volume during catastrophic events.

INTRODUCTION

In the Swiss Alps there exist some 80 hydroelectric reservoirs and balance storages. Many of these are threatened by avalanches. The prime danger when avalanches are reaching reservoirs is water spilling over the dam and subsequent flood damage downstream. Two effects may cause the spilling. First, dynamic effects due to the avalanches (flood waves). Second, the static

¹ Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research, CH-7260 Weissfluhjoch-Davos, Switzerland

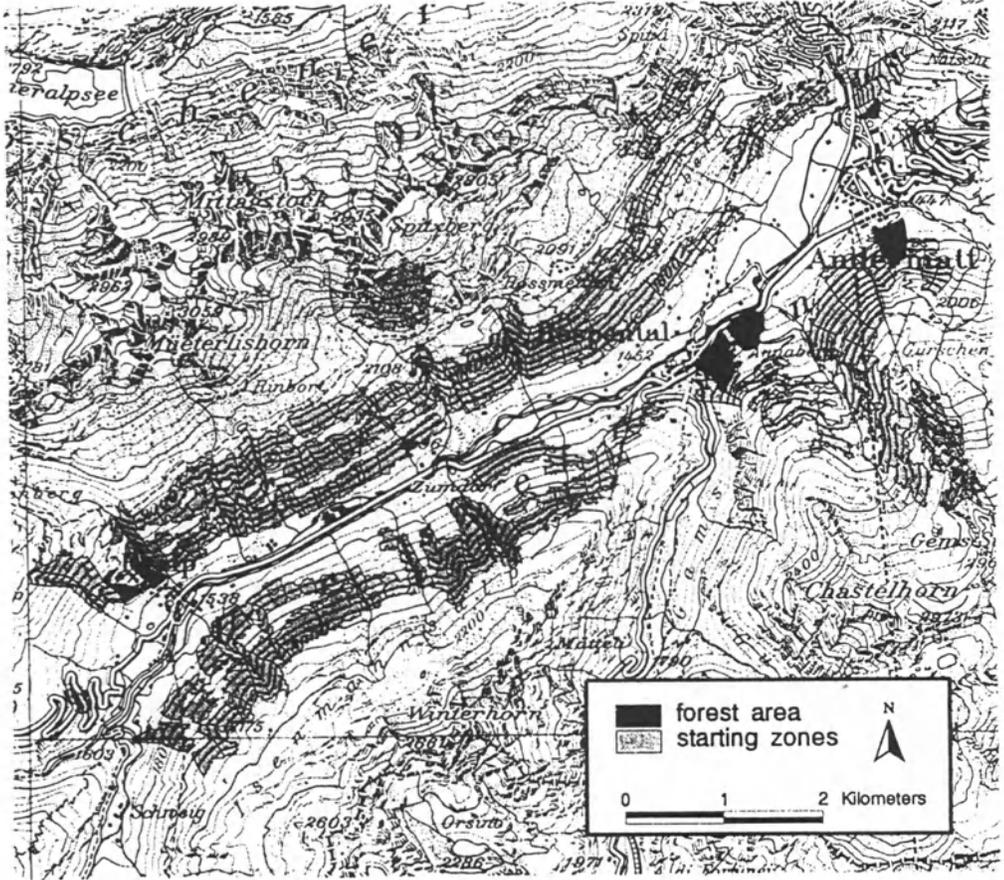


Figure 1: The Urseren valley with examined avalanche starting zones²

water displacement of the avalanche snow may cause overflow.

This paper is concerned only with the second issue. The problem arose in the course of consulting work on the necessary safety volume in a hydroelectric reservoir at the Grimsel Pass in the Bernese Oberland. In this particular case, former studies had shown that water displacement by the avalanche mass and not surge waves are critical. It now was necessary to estimate the maximum possible avalanche volume that could reach the reservoir during an avalanche period.

Literature studies revealed little research in this area. There exist some papers on avalanche activity and yield of avalanche mass, but these studies concentrate on total avalanche volume during wintertime. Neither has any systematic analysis been presented in earlier expertise work on avalanche problems at reservoirs.

² Digital Map data from: "Pixelmaps of Switzerland": © Federal Office of Topography
 Topographic Data: DGM 25 © 1994 Federal Office of Topography
 Reproduced with permission from the Federal Office of Topography of July 16, 1995

We devised the following plan to estimate the avalanche volume that can reach a reservoir during an avalanche period:

- 1 Determination of all avalanche starting zones in the reservoir area.
- 2 Calculation of the maximum amount of snow that can reach the reservoir for all avalanche tracks. (calculation according to [7])
- 3 Assessment of the avalanche activity factor for the region of the reservoir and the desired return period. The avalanche activity factor is defined as the ratio of the areas of starting zones that actually release during an avalanche catastrophe to the area of potential starting zones.
- 4 When the area that has to be assessed has many avalanche tracks, the maximum possible avalanche volume for the desired return period can be directly calculated by multiplying the avalanche activity factor with the maximum possible avalanche volume (second point). For areas that are smaller, the avalanche activity is subject to accidental variations. To calculate the probability that more avalanches release than in the regional average, we can calculate a binomial distribution of avalanche probability. (We assume avalanches of each track to start with a probability equal to the regional avalanche activity factor and independent of other tracks.)

This paper concentrates on the avalanche activity factor (point 3) and its determination at the Urseren valley.

Our experience and records of major avalanche events show on one hand that during a heavy storm several major avalanches, sometimes from different expositions, can start in a short time (i.e. hours). On the other hand, even during catastrophic events, some known (and otherwise frequent) avalanches did not release. The reason for this is largely obscure.

In view of the fact that there is no way to solve the problem by theoretical arguments, we decided to study some historical avalanche situations to elaborate a more qualified guess about avalanche activity. In consideration of the fact that there exists no reliable data of avalanches at reservoir sites, we studied a valley without reservoirs, but where we have fairly exact records of avalanche activity. This is the Urseren valley at the San Gotthard.

THE STUDY AREA

The Urseren valley is the uppermost part of the Canton of Uri. It offers access to the passes of Saint Gotthard, Oberalp and Furka. The broad valley floor lies 1500 meters above sea level (Which in also a typical altitude for reservoir sites in the Alps). From here the valley flanks rise to terraces at about 2100 m. Most avalanches reaching the valley floor start at these flanks. Avalanches that start at higher altitudes typically stop at the upper terraces and do not reach the valley floor. Figure 1 shows the Urseren valley, the studied starting zones are marked. The Urseren valley receives much snow both, from the south and from the north. At Andermatt (1500 m above sea level) the average maximum snow cover during winter is 130 cm. The studied area measures 44.6 km², 10.2 km² of which are potential starting zones. We distinguished 57 different potential avalanche tracks and 115 starting zones. On either side of the valley the starting zones have an average slope angle of 35°.

THE STUDIED AVALANCHE EVENTS

Three severe avalanche catastrophes were examined. The corresponding return periods were estimated by counting the number of avalanche catastrophes of similar magnitude as the examined events that occurred in the study area in the past 100 years. (For some older events, only activity of avalanches that caused destruction is known.) Table 1 shows the new snow heights and return periods for these events. It is noteworthy that return periods obtained from avalanche activity do not correspond to those obtained by applying extreme value statistics of new snow heights or snow cover increases to these events.

date	estimated return period in the Urseren valley	new snow in Andermatt		snow cover increase in Andermatt in 3 days
		during 24 hrs	during 3 days	
18.-20.1.1951	20 to 50 years	40 cm	82 cm	75 cm
4.-6.4.1975	50 to 100 years	105 cm	225 cm	123 cm
6.-9.2.1984	10 to 20 years	50 cm	111 cm	91 cm

Table 1: Data of the examined avalanche events.

The country-wide avalanche catastrophe of January 1951 is the most severe that happened in Switzerland during this century. 74 persons died.

In the Urseren valley, the 3-day sum of new snow was not extraordinary. In spite of this, 18 avalanches caused destruction and 11 casualties in the observation area. Nine of the casualties were caused by one single avalanche. Despite of this grave balance, the total number of observed avalanches is less than in 1975. We estimate that events of the intensity observed in 1951 have a return period of about 20 to 50 years.

In April 1975, the snowfall concentrated on the Grisons Oberland and the Canton of Uri. At Andermatt heavy snowfall of more than one meter in one day and a sum of more than 2 m in three days was recorded. If we consult extreme-value statistics, this amount of snow corresponds to a return period of 300 years. However the advanced season resulted in rapid settlement, so the snow cover increase was 'only' 123 cm within three days. Of the avalanches that released, 30 caused damage, one person was killed (being outside the house). If we compare avalanche activity in 1975 with other events, we can see that avalanche protection measures realised since 1951 probably have prevented much greater damage and saved many lives. The return period for such an avalanche event exceeds 50 years.

In February 1984, a major avalanche period hit the northern part of the Alps, especially the eastern Bernese Oberland, Uri, and the northern part and the Oberland of the Grisons. In the Urseren valley, 12 avalanches caused damage. This event may have had a return period of about 10 to 20 years.

METHODS

First, the precise study area was determined. We restricted ourselves to parts that are inhabited in winter, so we could be sure that most major avalanches were recorded. Then slope angles were determined by the geographic information system "Arcinfo". Areas with slopes between 28 and 50 degrees were considered as potential avalanche starting zones. Areas steeper than 50

degrees were considered too steep for big avalanches to be released there. These areas were split into different avalanches next. To allow easier input of the avalanche size observed during the examined events, each avalanche path could be subdivided into multiple starting zones.

Forested areas and areas with retaining structures were excluded in order not to have to take into account forest conditions and efficiency of retaining structures. All avalanches that descend undetected because they did not reach the valley floor, or very small avalanches that were possibly not recorded were also excluded.

Second, we consulted avalanche chronicals, cadastres and the "Winterbericht" of our Institute for the examined avalanche periods. For the study area, all the observed avalanches were recorded and their size was estimated. This was the most critical step in the study, because the actual starting zone was virtually never directly observed, nor was the snow volume of the avalanches ever measured. Most avalanches have several distinct starting zones and often several starting zones lie one below the other. Because of this, it is often necessary to guess from the avalanche deposits and the runout length whether one or several starting zones contributed to an avalanche.

RESULTS

Table 2 shows avalanche activity in absolute terms as well as percentage of potential starting zones. A further division is made to investigate whether exposition of the starting zones has influenced avalanche activity. The total avalanche volumes given in table 2 are based on the extent of the observed starting zones and the 3-day snow cover increase measured at Andermatt (table 1).

	areas of potential starting zones	avalanches		
		1951	1975	1984
on all slopes	10.21 km ²	3.46 km ²	4.68 km ²	2.14 km ²
% of total area		34 %	46 %	21 %
estimated total volume		2.3*10 ⁶ m ³	5.2*10 ⁶ m ³	1.8*10 ⁶ m ³
northern slopes	4.96 km ²	1.88 km ²	3.26 km ²	1.03 km ²
% of N slopes		38 %	66 %	21 %
estimated volume on N slopes		1.3*10 ⁶ m ³	3.6*10 ⁶ m ³	0.85*10 ⁶ m ³
southern or western slopes	5.24 km ²	1.58 km ²	1.42 km ²	1.11 km ²
% of S or W slopes		30 %	27 %	21 %
estimated volume on S or W slopes		1.1*10 ⁶ m ³	1.6*10 ⁶ m ³	0.9*10 ⁶ m ³

Table 2: Areas of starting zones, avalanche activity factors (in %) and avalanche volumes during major events in the Urseren valley.

CONCLUSIONS

- 1 As the frequencies of the studied events were determined by comparing them with the region's avalanche record of the last 100 years, avalanche activity in the region is by definition representative of the corresponding return periods. (It is not necessary to bother about relationship between weather and avalanches.) The number of 57 potential avalanche tracks that were observed gives a statistically stable mean for each return period.
- 2 For the central part of the Alps and comparable conditions, the avalanche activity factors we found can be assumed to be a good guess. In other regions, avalanche catastrophes may not show the same pattern and avalanche activity may be different. It is also probable that these results do not apply to much steeper or flatter terrain.
- 3 Data of the 1975 event suggests that depending on weather conditions, slopes of a particular exposition can be much more prone to avalanching than others. This has to be taken into account when examining an area where avalanche starting zones of a particular exposition dominate.

We are aware that our investigation is only a case study for a particular situation and based on limited data. But, when dealing with natural hazards, one has often to make engineering decisions based on poor knowledge.

LITERATURE

- [1] Calonder P., 1986: Ursachen, Wahrscheinlichkeit und Intensität von Lawinenkatastrophen in den Schweizer Alpen. *Diploma thesis, Geographical Institute, Zurich University.*
- [2] Courvoisier H. W. and Foehn P., 1975: Die ausserordentlichen Schneefälle im Winter und Frühling 1974/75. *Wasser- und Energiewirtschaft No. 11/12 1975.*
- [3] Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research: Schnee und Lawinen in den Schweizeralpen Winter 19.../..., Winterberichte. *CH-7260 Weissfluhjoch-Davos, Switzerland*
- [4] Foehn P., 1975: Statistische Aspekte bei Lawinenereignissen. "Interpraevent 1975" *Int. Symp. "Schutz alpiner Lebensraume", Innsbruck; Vol.1, p.292-304*
- [5] Foehn P., 1985: Die Lawinenkatastrophe vom Februar 1984. *Schnee und Lawinen in den Schweizeralpen Winter 1983/84, Winterbericht Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research, CH-7260 Weissfluhjoch-Davos, Switzerland*
- [6] Oechslis K., 1989: Lawinenatlas Uri; Lawinenchronik Uri 1607 - 1989. *Forestry service of the Canton of Uri, Altdorf, Switzerland*
- [7] Salm B, Burkard A. and Gubler H.U., 1990: Berechnung von Fließlawinen. Eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen. *Report No. 47, Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research, CH-7260 Weissfluhjoch-Davos, Switzerland.*

Prévision locale du risque d'avalanches Alpe D'Huez, domaine des Grandes Rousses

J.-M. Daultier¹

RESUME

Elle associe deux démarches complémentaires : la première, empirique, résultant de l'expérience des pisteurs, la deuxième informatique, utilisant des règles de calcul et une bibliothèque de données concernant la neige. Ce système a pour nom NXLOG.

** Il nous permet de suivre 132 des 198 sites avalancheux répertoriés sur le domaine skiable.*

** Il s'appuie sur 3 postes de relevés nivo-météo d'altitudes différentes, pour gérer 4 secteurs distincts.*

De Décembre 1990 à Avril 1994, fonctionnement avec le système AVALOG. Sur le secteur le plus représentatif, l'accord humain/machine est de l'ordre de 90 %, avec une utilisation systématique de l'explosif dès que le taux de probabilité dépasse 0,3.

La mise en place de NXLOG sur la saison 1994/95 a vu baisser le taux d'accord à 83% avec un taux d'incohérence proche de 10%.

La transmission de l'information se fait par la rédaction d'un bulletin multilingue ponctuel, à durée de validité limitée à l'attention des professionnels et du public, affiché dans les sites à grosse fréquentation.

A l'avenir, l'automatisation du système d'enregistrement des paramètres météo couplé à une expertise systématique des sites est prévue afin de pouvoir apprécier le risque avant de monter sur le terrain.

ABSTRACT

It is the combination of 2 complementary approaches. The first one, empirical, is the result of the patrollers experience, and the second one, which is based on data processing, uses symbolic calculation, and a library of snow events. This system is called NXLOG

** It allows us to deal with 132 out of the 198 avalanche spots, indexed on the resort.*

** It is based on 3 forecast stations at different heights, to deal with 4 separated areas.*

From December 1990 until April 1995, we have been using the AVALOG System.

Concerning the main area, the agreement man/computer is about 90%, and we have systematically used explosives, when the potential rate raised over 0,3.

Using NXLOG for the last winter season, the agreement rate declined down to 83% with an incoherence rate approaching 10%.

The transmission of the information is based on the composition of a multilingue bulletin, concerning a particular area during a short time, which is given to professional partners and customers, and posted up in the main places of the resort (lifts, Tourist Office,...)

In the future, the automation of the recording system for meteorological parameters, in order to make systematical analysis, is planned for us to appreciate the avalanche risk before blasting operations.

(¹) Sécurité des Pistes 38750 ALPE D'HUEZ

INTRODUCTION

Le domaine skiable de l'Alpe d'Huez s'étend sur 3 000 hectares. Il concerne 7 communes dont les altitudes sont comprises entre 1350 m et 3300 m. Les différents secteurs géographiques ont des expositions très différentes et des avalanches sont observées quelque soit la progression des perturbations.

Par ce fait, l'incessante activité avalancheuse du massif nous impose un suivi permanent de la stabilité du manteau neigeux .

La mise en place d'un système d'aide à la décision dans la gestion du risque d'avalanches devient indispensable. Et il est de notre devoir de transmettre au public les informations sur lesquelles se sont fondées nos décisions.

1) SYSTEME EN PLACE

Le système de prévision du risque d'avalanche en place est NXLOG, ce logiciel est la contraction de NXD + AVALOG, c'est une combinaison complémentaire; le raisonnement par déduction utilisant des règles expertes et le raisonnement par analogie exploitant les événements du passé. (ref) ²

Le logiciel nous donne, par couloir avalancheux en tenant compte de la topographie locale, un indice de risque compris entre 0.01 et 1, l'indice le plus élevé devant correspondre à des départs naturels.

2) PRESENTATION DU SITE

La chaîne des Grandes Rousses est orientée Nord-Sud sur 10 kilomètres, le massif du Taillefer et la chaîne de Belledonne partagés par la vallée de la Romanche sont d'une altitude nettement inférieure et n'offrent que très peu d'obstacle aux perturbations venant d'Ouest à Nord.

Sur le domaine skiable, nous avons 198 points de déclenchements, dont 132 sont traités pour des expertises.

3) DISPOSITION DES POSTES D'OBSERVATION NIVO-METEOROLOGIQUE

REPARTITION SUR LE DOMAINE

Parmi les 6 postes d'observations nivo-météorologiques du domaine skiable, 4 font partie du réseau d'observations de Météo-France. Et 3 d'entre eux servent à l'utilisation de NX LOG.

ALPE D'HUEZ 1800 Pour les expertises sur la combe de Poutran. Ce poste détient beaucoup d'archives nivo-météo (depuis 1979) mais très peu d'archives d'événements avalancheux. Les avalanches relevées durant ces années concernent les secteurs d'altitude et sont attribuées au poste d'observation de 2300.

ALPE D'HUEZ 2300 Pour les expertises sur le versant ouest du Pic Blanc les événements climatiques et nivologiques étant très différents de ceux effectués à la station de 1800, il serait peu fiable d'utiliser les archives des faits avalancheux antérieures à la date de création du poste d'observation.

(²) Robert BOLOGNESI IFENA DAVOS

VAUJANY 2800 Pour le versant Nord-Ouest du Dôme des Petites Rousses. Ce poste est tout récent, la mise en place date de Décembre 1993. Les expertises AVALOG réalisées les années antérieures ont été décevantes et nous ont amené à créer un poste propre à ce secteur d'une gestion difficile et délicate : accès impossible à skis ou chenillette, d'une surveillance visuelle irréalisable depuis les points de tirs, d'un contrôle aléatoire des résultats d'un fort risque d'atteinte des remontées mécaniques de la part de plusieurs coulées.

4) PROBLEMES DES MESURES

ORGANISATION DES RELEVES

Actuellement 3 postes d'observations traitent les données NXLOG et 3 observateurs par poste se remplacent pour obtenir un suivi permanent et une approche comparative de leur appréciations. La saisie des données est effectuée par le même opérateur sur chaque poste, cela lui permet de déceler des incohérences et de connaître plus précisément l'état de mise à jour des différents fichiers.

FACILITE DE MISE EN OEUVRE

Il nous est difficile et contraignant d'effectuer les observations en dehors des horaires d'ouvertures des remontées mécaniques, ce qui pose quelques problèmes les jours de déclenchements d'avalanches, et lorsque le vent empêche les remontées mécaniques de fonctionner.

REPRESENTATIVITE DES DONNEES NIVO PAR RAPPORT AU SITE D'EXPERTISES

Les observations doivent refléter les conditions réelles des couloirs avalancheux il est difficile de traiter des couloirs d'orientations opposées à partir d'un seul point de mesures. Le profil longitudinal du massif montagneux étant légèrement convexe, les couloirs avalancheux trop distants du poste d'observation apportent de mauvais résultats par le traitement du logiciel.

5) HISTORIQUE DES EXPERTISES AVEC LES RESULTATS

90/91. Le traitement AVALOG concerne pour cette saison 35 couloirs du secteur de Mâcle sur la période du 15 Décembre au 15 Mars. Sur 1357 contrôle de déclenchement d'avalanches par les artificiers, on relève par comparaison 129 diagnostics du logiciel divergents, ce qui correspond à un taux d'accord de 90.5%.

91/92. Toujours avec le traitement AVALOG, sur le même secteur, l'accord humain/machine est de 91.2 %. Les secteurs avoisinants obtiennent des résultats nettement moins bons ; le secteur du Pic Blanc s'associe d'un accord de 66.4 %, le secteur de Sarenne obtient un accord de 61.7 %, Vaujany de 48.8 %, Oz de 58.3 % et auris de 36.6 %. Ces résultats mettent en évidence les gros problèmes de représentativité des données par rapport à la proximité des couloirs avalancheux. Nous avons pris en compte cette saison 170 couloirs avalancheux et seulement 2 postes d'observations.

92/93. L'hiver peu enneigé de cette saison nous a fourni très peu d'événements avalancheux et aucun résultat n'a pu être retenu.

93/94. Toujours avec AVALOG, seules des expertises sur les secteurs de Mâcle et du Pic Blanc ont été suivies, sur 65 couloirs. De très sélectifs diagnostics ont été observés, les résultats étant encourageants. Le nombre important d'avalanches observées et la qualité des résultats nous ont permis de déterminer un seuil de 0.3 sur l'échelle d'indices fourni par le traitement informatique, à partir duquel l'explosif est fortement conseillé.

94/95. La mise en place complète de NXLOG sur ces 65 couloirs, a diminué la qualité des résultats.

Le taux d'accord passe à 83.5 % par rapport a la version précédente AVALOG .

Nous avons observé que le décalage dans le temps, entre les déclenchements artificiels et les faits météorologiques, est souvent la source de ces écarts de résultats.

RESULTATS 94/95

		logiciel	
		non avalancheux	avalancheux
observations de terrain	non avalancheux	non traité	7.4%
	avalancheux	9.1%	83.5%

Dans cette première approche de statistiques, pour ces calculs, nous avons défini un seuil de 0.2 en dessous duquel nous considérons que le logiciel indique la stabilité du manteau neigeux. Nous n'avons pas étudié les journées non avalanches, car elles n'apportent pas d'éléments directs sur la prévision du risque et feront l'objet d'études plus approfondies sur les performances du logiciel.

6) UTILISATION DES RESULTATS

OBSERVATIONS DES EXPERTISES MACHINE

Après chaque journée de déclenchements, un comparatif entre les événements avalancheux et les résultats du logiciel est effectué. En pratique, seuls les couloirs déterminant l'ouverture des pistes principales sont étudiés avec beaucoup d'attention.

La version NXLOG, nous permettant de faire des simulations, il est intéressant dans des situations météorologiques particulières d'effectuer des expertises.

UTILISATION PAR RAPPORT AUX DECLENCHEMENTS DES AVALANCHES

Les résultats des expertises n'ont pas d'effets directs sur les procédures de déclenchements artificiels, mais, lors d'indices de risques élevés, il est demandé, aux pisteurs du secteur concerné, d'apporter une attention particulière à ces couloirs afin de s'assurer du bon fonctionnement du logiciel et de déterminer s'il y a les causes des non correspondances. Ce produit nous permet d'avoir rapidement un avis sur l'ensemble des points sensibles du domaine skiable, avec une approche très mathématique que la mémoire humaine ne peut assurer.

7) INFORMATION

REDACTION D'UN BULLETIN

En utilisant les résultats du logiciel, ainsi que les observations du terrain et les informations fournies par METEO-FRANCE, nous rédigeons un bulletin local sur les risques d'avalanches.

AFFICHAGE AU PUBLIC

Les bulletins multilingues sont affichés dans la station et au passages d'accès au remontées mécaniques d'altitude. Ils sont aussi transmis aux services de l'équipement, à la gendarmerie et au poste de secours en montagne, à leur demande. D'autres sont diffusés aux offices du tourisme et

aux écoles de ski. Des bulletins sont disponibles au service des pistes pour les organismes de vacances (Club Méditerranée, Pierre et Vacances, divers Tours Opérateurs). Ces informations concernent les zones non sécurisées proches du domaine skiable.

SURVEILLANCE DE L'INFORMATION

Toute information pour être crédible doit être suivie et mise à jour. Les bulletins ayant une validité maximale de 24 heures, il est impératif d'enlever les anciens. Ils ne sont rédigés que lorsque le risque est réel, afin de ne pas habituer les clients à la vue de cet affichage.

8) RECHERCHE D'AMELIORATIONS

MODIFICATION DES PARAMETRES

De nombreuses modifications ont été apportées au cours de l'été 1992 : modifications des règles générales (certaines ayant des poids trop déterminants) et des paramètres de certains sites avalancheux .

Depuis, nous n'avons souhaité aucune modification, les résultats nous paraissent corrects.

RECHERCHE DES MAUVAIS FONCTIONNEMENTS

Certaines mesures sont difficiles à réaliser rapidement et précisément comme la mesure de transport de neige par le vent ; souvent l'appareil se bouche et les orifices se colmatent. Par fort enneigement, le profil des couloirs change, certains voient leur pente s'accroître, d'autres ne provoquent plus d'avalanches.

Il faut donner plus d'importance à la correspondance dans le temps entre les événements climatiques, les observations nivo-météorologiques et les déclenchements artificiels. Il serait très intéressant d'avoir des données simultanément aux départs d'avalanches naturelles, cela nous fournirait des informations précieuses.

Certains couloirs ne sont déclenchés que le lendemain, voire le surlendemain des chutes de neige et les événements avalancheux, par ce fait, sont enregistrés sur des journées où les conditions météorologiques sont assez différentes.

CONCLUSIONS

Le système définitif est celui en place déjà cette saison, c'est à dire 3 postes d'observations sur trois secteurs d'altitudes et d'expositions différentes. Avec au total 132 couloirs avalancheux suivis.

A l'avenir nous souhaitons l'automatisation du système pour les secteurs d'altitude variant de 2800 m à 3300 m.

Il est de plus en plus important de la part des responsables de Service de Pistes, d'avoir un avis rapide concernant les points sensibles du domaine skiable. Cet avis sera basé sur des éléments concrets, rendant indispensable une disponibilité permanente du système.

L'utilisateur crée une synthèse des diagnostics sur laquelle sont appuyées d'importantes décisions. Ce produit n'en est plus au stade d'expérimentation, il a vraiment son rôle d'aide à la décision.

MEPRA et le risque de déclenchement accidentel d'avalanches

G. Giraud, J.-P. Navarre¹

RESUME

Le schéma d'analyse de l'instabilité de type "naturel" du manteau neigeux et du risque d'avalanche associé se sont révélés, dans MEPRA, satisfaisants que ce soit en utilisation quasi opérationnelle ou lors des validations. Par contre, des progrès importants restent à faire pour avoir une gestion correcte du risque de déclenchement accidentel d'avalanches (passage de skieurs). Initialement, l'analyse était basée sur la morphologie du profil de résistance à l'enfoncement. Une structure de type plaque était recherchée dans les couches superficielles du manteau neigeux puis une analyse experte positionnait un risque de déclenchement accidentel d'avalanches. L'absence de prise en compte du transport de neige par le vent dans la chaîne SAFRAN/CROCUS/MEPRA, rendait l'apparition de profils à plaque très rare. Des modifications ont donc été apportées dans CROCUS concernant la morphologie et la masse volumique d'une neige déposée ventée. Parallèlement, un critère mécanique d'instabilité du manteau neigeux de type accidentel a été défini puis testé sur 5 hivers en Vanoise. Des progrès attendus dans la connaissance du matériau neige et de sa capacité à propager les contraintes permettront d'affiner encore l'analyse MEPRA.

ABSTRACT

The operational use and the ten years validation seem to prove that the analysis scheme of the "natural" snow pack instability and avalanche risk, in MEPRA, works efficiently. Furthermore, MEPRA has to improve its accidental (unstable snow pack for skiers) risk analysis scheme, only based on form and structure of the snow profile. Before, MEPRA analysed the surface layers to detect a slab structure and then an expert approach (slab thickness and covering, weak layer...) gave an accidental avalanche risk. As the SAFRAN/CROCUS/MEPRA chain did not take into account the wind transported snow phenomena, slab profiles were very exceptional. Then, in CROCUS, density and crystal characteristic modifications of windy fresh snow are in test. At the same time, mechanical accidental stability index, based on the skier gravity stress, are defined and 5 winter validations on Vanoise massif are carried out. A better understanding of the recent snow mechanical characteristics and its capacity to propagate the stress will also allow us to improve MEPRA analysis.

RAPPEL SUR MEPRA

Les systèmes experts sont des logiciels dont le but est de reproduire le raisonnement d'experts humains dans un domaine particulier. Ils se composent d'une base de connaissance représentant le savoir transmis par les experts et appartenant exclusivement au domaine traité et d'un moteur d'inférence chargé de diriger la résolution du problème.

¹ Météo-France Centre d'Etudes de la Neige 1441 rue de la piscine 38406 Saint Martin d'Hères
Tel : (33) 76 63 79 16 Fax : (33) 76 51 53 46

a) La base de connaissances

La structuration de la base de connaissances de MEPRA (Giraud, 1992), en sous problèmes résolus dans des bases de règles disjointes, a permis de construire le système par étape, d'adjoindre ou de modifier des bases de règles sans modifier le fonctionnement général du système. Grâce à cette souplesse de développement, MEPRA a été couplé au modèle d'évolution énergétique et morphologique CROCUS (Brun, 1989) pour améliorer le suivi temporel de l'évolution du manteau neigeux. Ensuite, pour décrire la grande variabilité spatiale du risque d'avalanches, la chaîne SAFRAN/CROCUS/MEPRA a été créée. MEPRA multiplie ainsi les expertises sur des pentes virtuelles caractérisées par une altitude (pas de 300 m), une exposition et une pente. De nombreuses modifications ont donc été apportées à la base de connaissances de MEPRA pour une prise en compte optimum de la modélisation détaillée du manteau neigeux. L'estimation du risque de départ naturel d'avalanches a fait l'objet d'une validation sur 10 ans pour la massif de la Vanoise (Giraud G., 1994) en donnant des résultats très satisfaisants.

b) Le risque de déclenchement accidentel d'avalanche

Cependant, la base de règles gérant le risque de déclenchement accidentel d'avalanches, malgré plusieurs modifications, restait de qualité médiocre. L'analyse était principalement basée sur une typologie des profils de sondage par battage. Dans cette classification, le sondage était découpé en deux parties : une partie supérieure composée soit de neige récente soit de neige de type fonte et une partie inférieure regroupant les neiges évoluées. Une sous classification était ensuite réalisée prenant en compte l'allure du profil de résistance à l'enfoncement. Des critères experts concernant l'épaisseur de la plaque et son enfouissement complétaient l'analyse et permettaient de positionner un risque de déclenchement accidentel d'avalanches dans une échelle à 3 niveaux (faible, modéré, fort). Deux raisons principales expliquent partiellement la qualité médiocre des résultats :

- profil supérieur de type plaque quasi inexistant du à l'absence de prise en compte de l'action mécanique du vent sur la morphologie du cristal de neige fraîche pendant la précipitation

- manque de finesse dans l'analyse du à une approche mécanique trop liée au profil de résistance à l'enfoncement

DEFINITION D'UN CRITERE MECANIQUE

Pour améliorer la prise en compte de la modélisation détaillée du manteau neigeux et l'analyse mécanique, un indice d'instabilité du manteau neigeux a donc été défini. Pour chaque profondeur z des différentes strates supérieures du manteau neigeux, l'indice mécanique d'instabilité est de la forme:

$$I_s(z) = \frac{\text{résistance au cisaillement}}{\text{contrainte totale de cisaillement}} = \frac{C(z)}{\tau(z)} = \frac{C(z)}{\tau_n(\text{neige}) + \tau_s(\text{skieur})}$$

Dans MEPRA, les valeurs de C (résistance au cisaillement) sont estimées en fonction du type de grains, de la masse volumique et de l'état thermique de chaque strate. Les contraintes tangentielles de gravité τ_n , à chaque profondeur z , sont calculées pour l'estimation du risque de départ naturel d'avalanches.

Pour la détermination de τ_s , quelques hypothèses ont été nécessaires sur :

- les contraintes additionnelles (liées au poids du skieur), à l'intérieur du manteau neigeux, qui vont suivre une distribution de type Boussinesq ou de Westergaard (approche dérivée de la mécanique des sols, Costet, 1969).
- l'estimation de la valeur de la charge que peut exercer un skieur sur le manteau neigeux. Cette valeur est beaucoup plus délicate à approcher, compte tenu des différents paramètres qui peuvent intervenir: majoration de la charge liée à certains mouvements du skieur (virage, prise d'appui), répartition des charges sur les skis, interactions entre les skis et la neige pour la transmission de la charge, portance des strates supérieures du manteau neigeux,... Dans notre approche, le skieur est considéré parallèle à une courbe de niveau. Son poids P (85kgf) est réparti sur la moitié de la longueur des skis, que l'on assimile à "une semelle souple rectangulaire" de longueur L (1m) et de largeur B (0.2m), informations fournies par la société ROSSIGNOL.

Un calcul analytique de τ_s , fonction de la profondeur h, a été réalisé sur un manteau neigeux assimilé à une plaque de neige de masse volumique 300 kg/m^3 auquel un coefficient de majoration ($k=1.5$) lié à la prise d'appui (Föhn P., 1992) a été rajouté (figure n° 1). De plus, la charge transmise et la répartition des contraintes ne sont pas identiques selon que les skis reposent sur une neige dure et portante, ou une neige fraîche (enfouissement). Ainsi, en mécanique des sols, on constate qu'il y a accentuation de la contrainte sur la verticale si le matériau a une plus faible cohésion. Des mesures présentées par M. Schneebeli (Schneebeli, 1994), montrent également qu'à 20 - 30 cm sous un skieur, les contraintes verticales peuvent varier significativement selon l'état de la neige. Ces phénomènes sont en fait plus complexes avec la stratification du manteau neigeux et ils peuvent avoir des effets contradictoires:

- une strate rigide peut conduire à un "étalement" de la charge et donc à une diminution de la charge transmise à la strate sous-jacente;
- cette rigidité peut aussi être source de vibrations et de pics brefs de contraintes plus importantes et non amorties.

Une première approche simplifiée de ces problèmes a été introduite dans le calcul de l'indice d'instabilité. Un coefficient β permet une prise en compte simplifiée de ces problèmes. Ce coefficient varie en fonction des différents types de neige recouvrant la strate analysée. Ses valeurs extrêmes sont de 0,5 pour une strate recouverte entièrement de neige regelée à 1,5 pour une couche recouverte de neige fraîche. L'indice mécanique d'instabilité est donc le suivant :

$$I_s(z) = \frac{C(z)}{\tau_n(\text{neige}) + \beta * \tau_s(\text{skieur})}$$

MODIFICATIONS APORTEES A MEPRA

Une définition stricte des conditions dans lesquelles le critère mécanique précédemment défini I_s va être utilisé s'impose. Ce critère ne s'applique que si une structure de plaque est présente dans les couches superficielles du manteau neigeux. Le système expert va donc rechercher une strate de neige pouvant avoir un comportement de plaque. La définition actuelle d'une telle strate est la suivante : neige sèche de type lambda, lambda fin, grain fin ou fin anguleux et ayant une résistance limite au cisaillement supérieure à 3 kgf/dm^2 . La découverte d'une telle couche déclenche le calcul de l'indice dans les strates inférieures. Le risque de déclenchement accidentel d'avalanches sera faible si toutes les strates ont un $I_s > 2$. Il sera modéré si une strate à un I_s compris entre 1 et 2 et fort si un I_s est inférieur à 1.

De plus, pour faciliter l'apparition de plaques dans la chaîne SCM, des modifications ont été apportées à la formule CROCUS sur la masse volumique d'une neige fraîche se déposant ventée.

Dans le même esprit, à partir de mesures effectuées au col du lac blanc (Guyomarc'h, 1992), les caractéristiques morphologiques de la neige fraîche (dendricité et sphéricité) varient en fonction du vent pendant la chute.

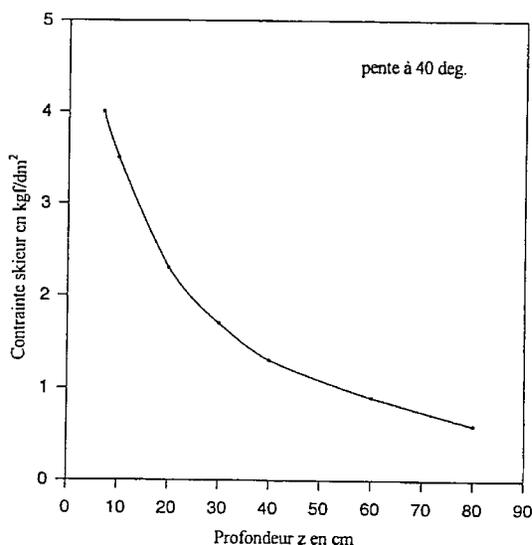


Figure 1 : contrainte τ_s due au skieur

RESULTATS ET COMMENTAIRES

Cette approche nouvelle dans l'estimation MEPRa du risque accidentel d'avalanches a été dans un premier temps testée sur certains épisodes du passé. Le choix s'est porté sur des situations à fort déclenchement d'avalanches par des skieurs : janvier 1985 et janvier 1990. Dans ces deux cas, un signal fort s'est dégagé, la montée du risque correspondant aux premiers déclenchements d'avalanches signalés dans le réseau nivométéorologique.

Fort de ce premier test concluant, une validation sur 5 ans et pour la massif de la Vanoise a été entreprise. Cette opération non terminée actuellement consiste à comparer une activité avalancheuse de type accidentel au risque MEPRa précédemment défini. Le risque accidentel MEPRa est lié à une forte instabilité latente du manteau neigeux. Cet état n'est pas observable et difficilement mesurable. Seules ses conséquences peuvent être connues si la fréquentation de la montagne est suffisante. Pour s'affranchir de ce problème de fréquentation, nous avons décidé de travailler sur le hors pistes de domaines skiables, conscient des perturbations liées aux déclenchements préventifs d'avalanches.

a) Indice d'activité avalancheuse

Un indice d'activité avalancheuse de type accidentelle a donc été calculé à partir des données de deux postes du réseau nivométéorologique : La Plagne et Les Arcs. Ces deux stations ont un service de prévision locale du risque d'avalanches (Schneider, 1991) et disposent d'une description précise sur support traitable des événements avalancheux de leur domaine. Les informations, date de l'avalanche et type (naturel, accidentel ou artificiel) de déclenchement, sont utilisées pour calculer le total journalier des événements de type accidentel. Ce nombre nous servira provisoirement d'indice d'activité avalancheuse de type accidentel. A noter que les épisodes à fort déclenchement accidentel se retrouvent dans les deux stations.

b) Indice de risque

Différents essais ont été réalisés pour stabiliser un indice de risque accidentel prenant en compte à la fois la répartition spatiale et l'intensité de la nouvelle variable. Un poids a donc été affecté à chaque niveau de risque : risque nul ou faible = 0 , risque modéré = 0.5 , risque fort =1. La probabilité de déclencher accidentellement une avalanche est d'autant plus forte que le nombre de pentes concernées est élevé. L'indice de risque est donc simplement la moyenne des poids affectés à chaque pente dans la tranche 1500 - 3600 m. soit

$$I_R = \frac{\sum_{expo=1}^{nbexpo} ((\sum_{alti=1}^{nbalt} (Rac(alti, expo)) / nbalt)}{nbexpo}$$

où

nbalt = nombre de niveau d'altitude (10 pour la Vanoise de 900m à 3600m par pas de 300m)

nbexpo = Nombre d'expositions du massif (nord, est, sud-est, sud, sud-ouest, ouest)

Rac(i,j) = valeur affectée au risque MEPRa pour la pente virtuelle d'altitude i*300 + 600 mètres et d'exposition j

c) Comparaison entre indice d'activité et risque

Pour chaque hiver, une représentation activité/risque a été réalisée sous forme graphique. La représentation chronologique de ces 2 grandeurs. permet une analyse a posteriori de certaines situations nivométéorologiques, un contrôle qualitatif des analyses MEPRa et a l'avantage de mettre en évidence les épisodes avalancheux d'un hiver. L'analyse des graphiques amènent les remarques suivantes :

- La correspondance entre le premier déclenchement et le positionnement d'un risque accidentel est souvent bonne voire très bonne

- les fins d'épisodes semblent moins bien gérés avec souvent le maintien d'un risque accidentel marqué, quoique à la baisse, mais sans déclenchement d'avalanches. Plusieurs explications sont possibles: l'instabilité du manteau neigeux a tendance à se localiser, de nombreuses pentes, et souvent les plus accessibles, ont été purgées accidentellement ou artificiellement et la médiatisation des accidents limitent la pratique du ski hors piste.

L'activité avalancheuse et le risque MEPRa tels qu'ils ont été définis précédemment ne sont pas des variables directement comparables. Pour une comparaison quantitative, il est nécessaire de définir des classes d'activités avalancheuses et des classes de risques. Dans un premier temps et par souci de simplification, il a été décidé de travailler sur l'occurrence des deux variables et donc de dresser des tableaux de contingence à 2 modalités hiver par hiver où i est la classe d'activité et j est la classe de risque. En ce qui concerne l'occurrence de risque, le seuil a été fixé à 0,2 pour éliminer les journées à risque accidentel MEPRa très localisé.

Voici en exemple un hiver à forte activité avalancheuse 1991/92 :

	Risques	
	Nul ou faible	Existant
Activité		
Nulle	81	47
Existante	3	9

Figure 2 : Tableau de contingence activité / risque pour l'hiver 91/92

CONCLUSION

Le nouveau schéma d'analyse des risques de déclenchement accidentel d'avalanche améliore fortement les résultats du système expert dans ce domaine. Sur les 5 hivers de test, les périodes à fort déclenchement accidentel ont été, pour la plupart, détectées. Par contre des fausses alertes apparaissent en fin d'épisodes et aussi lorsque l'instabilité a une durée limitée dans le temps. L'analyse nivologique et mécanique étant cohérente, une très faible fréquentation de la montagne (mauvaise condition météorologique, période creuse...) peut être une explication plausible. Une grande sensibilité de l'analyse au critère plaque (type de grain et résistance aux cisaillements) a été observée. Les travaux actuels sur le domaine skiable de Valfréjus (Duclos, 1993) devraient aboutir à une meilleure définition de ces critères. La présence dans le manteau neigeux d'une sous couche fragile est certainement une condition nécessaire à un déclenchement accidentel d'avalanches. Si cette condition s'avère suffisante, le prévisionniste avalanche disposera enfin d'un outil analysant correctement le risque généralisé de déclenchement accidentel d'avalanches.

BIBLIOGRAPHIE

- Brun E., Martin E., Simon V., Gendre C., Coléou C., 1989** - An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting, *J. of Glaciol.*, Vol 35, N°121, p333-342.
- Costet et Sanglera, 1969** - *Cours pratique de mécanique des sols*
- Duclos A., 1993** - Neige, vent et avalanches : quelques observations pour un meilleur diagnostic , revue de l'ANENA, *Neige et Avalanches*, n° 64, décembre 1993
- Durand Y., Brun E., Mérimond L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E., 1993** - A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, *Annals of Glaciol.*, Vol 18, p 65-71.
- Föhn P., 1992** - Stability evaluation for a sloping snowpack, Université d'été sur les risques naturels, session 1992: *Neige et Avalanches*, Chamonix, 14 au 25/09/92
- Giraud G., 1992** - MEPRA : an expert system for avalanche risk forecasting, Proceedings of the International Snow Science Workshop, 4-8 oct 1992, Breckenridge, Colorado, USA, p 97-106.
- Giraud G., Brun E., Durand Y., Martin E., 1994** - Validation of objective models to simulate snow cover stratigraphy and avalanche risk for operational avalanche forecasting, Proceedings of the International Snow Science Workshop, 30 oct - 3 nov 1994, Snowbird, Utah, USA
- Guyomarc'h G., Castelle T., 1992** - A study of wind drift snow phenomena on an alpine site, Proceedings of the International snow science workshop, 4-8 oct 1992, Breckenridge, Colorado, USA, p 57-67.
- Schneebeli Martin, 1994** - Variability of the mechanical properties of the snow pack in the starting zone of avalanches, colloque de l'E.G.S., 25-29 Avril 1994, Grenoble
- Schneider C., Navillod L., Julliot L., 1991**, Prévion locale du risque d'avalanches. Application quotidienne. Expérience de trois grandes stations des Alpes. Symposium ANENA 1991, Chamonix, p.136-144

Verification of avalanche danger with respect to avalanche forecasting - *Vérification du danger d'avalanche par rapport aux prévisions du risque d'avalanche*

P. M.B. Föhn, J. Schweizer¹

ABSTRACT

The ambitious goal of any avalanche forecasting group is to foresee the daily avalanche danger. In the last years it became obvious that good input data, computer modelling help, personal experience and expressive avalanche output variables are mandatory. Here another must in avalanche forecasting will be presented, namely the continuous and realistic verification of the output variables (degree of avalanche danger, endangered altitude zones and aspects).

The principal difficulties and possible solutions of verifying the local or regional avalanche danger are analyzed. It is shown that not only the areal observation problem is of prime importance but also the fact that, e.g. the two lowest danger degrees of the European danger scale may often only be verified by snow profile inspection and Rutschblock tests, whereas the upper degrees can mostly be verified by an intensive, areal observation of avalanche occurrences. Several transformation procedures and some verification examples are described. Any improvement of an avalanche forecasting system and finally also the credibility of avalanche warnings are based on appropriate verification procedures.

RÉSUMÉ

Le but de la prévision journalière des avalanches à l'échelle régionale est de prévoir le degré et les lieux de danger correctement. Dans les années passées diverses analyses ont montré que des données appropriées, le soutien par des modèles, l'expérience personnelle et une variable de sortie représentant au mieux la situation avalancheuse sont indispensables. D'autre part, la vérification journalière des variables de sortie (degrès de danger, altitudes et expositions dangereuses) est également de prime importance.

Nous présentons les principales difficultés rencontrées lors de la vérification du danger local ou régional ainsi que quelques possibilités de solution du problème. On montre que non seulement le problème de l'observation des avalanches est important, mais que par exemple les deux degrés de danger les plus bas de l'échelle européenne ne peuvent souvent être vérifiés qu'avec des profils de neige et des tests de glissement. Des procédures de transformation de telles informations en degrés de danger sont présentées à partir de quelques exemples. Il est clair qu'une bonne vérification des résultats est à la base de chaque amélioration des prévisions en augmentent la crédibilité.

INTRODUCTION

In the late seventies/early eighties several research groups developed avalanche forecasting models, which raised more than before - having only traditional, synoptic methods to forecast

¹Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research, CH-7260 Weissfluhjoch/Davos, Switzerland

avalanches - the demand of quantified verification of the avalanche danger or activity. Föhn et al. (1977), Williams (1979), Judson and King (1983), Buser (1983), Giraud et al. (1987) and finally Elder and Armstrong (1987) described some verification problems and made the first trials with verification procedures. At that time avalanche danger ratings were almost exclusively compared with various kinds of observed avalanche activity indices, i.e. pears were compared with apples. After adoption of the new European avalanche danger scale (1993) this handicap has been eliminated and here a new approach and some new and improved procedures for verification will be presented.

BRIEF REVIEW ON RECENT VERIFICATION RESULTS

Despite the fact that avalanche forecasting is going on since decades, the number of published verification results, describing methodological details and yielding longer verification series, are surprisingly small. The most informative ones are the ones of Elder and Armstrong (1987), Giraud et al. (1987), Remund (1993) and McClung and Tweedy (1994). Elder and Armstrong (1987) present forecast series from Colorado for one winter using the number of avalanches as verification base. They applied contingency tables for the verification. They describe 134 days using the 4 degree U.S. danger scale and report a success score of 64%. The ratio of days rated too high to the ones rated too low was 6 to 1. Giraud et al. (1987) describe forecast results for the French ski area of Vanoise for three winters. The verification has been done by an avalanche activity index, whereby artificially triggered avalanches got a weight of 0.5. Discriminating between 8 danger degrees (old French scale!) they still reached a success score of 56%. The ratio of days rated too high to the ones rated too low was 2 to 1. Remund (1993) reports a mean success rate of 69% for two regions of the Swiss Alps considering 5 danger degrees and a ratio of days rated too high to the ones rated too low of 1.3 to 1. Finally McClung and Tweedy (1994) describe forecast results for a highway in western Canada. They used the number and sizes of avalanches on highways for verification calculating a magnitude-frequency index for subcategories of "dry", "moist" and "wet" avalanches. Discriminating between avalanche and non-avalanche time periods and setting various warning levels between 0.5 and 0.7 for dry and moist/wet avalanches they achieved a success score between 73% and 79%.

AVALANCHE OUTPUT VARIABLE AND VERIFICATION PROCEDURES

"Any avalanche prediction method, whether of conventional, statistical, or even of physical nature, needs an appropriate avalanche variable in order to establish and to verify the method" (Föhn, 1977). This statement may be viewed as a point of departure for the new European avalanche danger scale (degree 1-5), which has been adopted by the European working group of avalanche warning services. The main guidelines of this scale have been described by Föhn (1985) and by Giraud et al. (1987). It comprises now a simple scale of the ordinal level (1 to 5) which expresses the probability of certain states of snow cover instability, described by main terms of increasing avalanche danger: *low*, *moderate*, *considerable*, *high*, *very high*. The avalanche danger may be approximated by the release probability A and by the avalanche volume V :

$$D \sim A \cdot V \sim \frac{1}{S} \cdot V \quad (1)$$

where S is snow cover stability and V the total avalanche snow volume.

It is obvious that the larger the released snow volume and the smaller the snow cover stability are, the larger the avalanche danger. The ratio of the snow cover stability index S' including additional loads to the natural snow cover stability index S may be approximated as (Föhn, 1981):

$$S' = \frac{S \cdot \tau_{xz}}{\tau_{xz} + \Delta\tau_{xz}} \quad (2)$$

where τ_{xz} = shear stress due to the weight of the snow cover

$\Delta\tau_{xz}$ = shear stress due to additional load as skiers, explosions etc.

The following Table 1 yields the specific stress relations of eq. (2). In order to approximate the verification for an individual forecasted day, it is simply assumed that in eq. (2) S' equals 1. According to the release conditions (type of triggering) S may be calculated. Thus the release probability A and hence the danger index D may be approximated.

If for a given day no avalanches were observed, nor triggering methods were in operation, one still can try to verify the lower part of the avalanche danger degree scale (1-3) by analysing snow profiles and Rutschblock tests. According to these lines (Remund, 1993) verified the forecasted degree of avalanche danger for two regions of the Swiss Alps during 4 winters (1987/88 - 1990/91). Calculating the daily danger values as percentage of the maximum, regionally possible danger totals an appropriate standardization has been achieved. The final summation of the daily scores gave a mean success score of 68 % for one and 70 % for the other region. It is obvious that the verification work for specific cases shall not be done obstinate, but integrating additionally the common sense interpreting the European danger scale, most cases (days) may be verified successfully.

Table 1: Various avalanche release sources described by the Swiss avalanche observation code and the proportion of the natural stress to the sum of the natural and the artificial shear stress (eq. 2).

Swiss avalanche observation code (1989)	Release by	$\frac{\tau_{xz}}{\tau_{xz} + \Delta\tau_{xz}}$
1 ... 3	no release despite various triggering sources	0.1 - 0.5
4	snow mobile	0.1
5	explosion, 1-2 kg	0.2
6	skier	0.5
7	natural and artificial	1
8	only natural	1
9	not known	0.8

VERIFICATION EXAMPLES

Summarizing the thoughts and facts presented up to now, we may conclude that verification success depends on the type of output variable which also decides if an expressive and hopefully objective verification method may be found. We believe that the European danger scale fulfils the above mentioned demands and is a good compromise of various earlier scales used in

Europe. It is simple and nevertheless contains the most important components of the avalanche danger (indices of release probability and avalanche volume). So a successful verification is in the reach of every organisation applying this scale.

As we in the last years developed and continuously verified different so-called expert systems to forecast the degree of avalanche danger (Schweizer and Föhn, 1995), some verification examples are presented in Fig. 1. With the aim of visualizing the daily course of forecast and verification results we want to draw attention to verification problems.

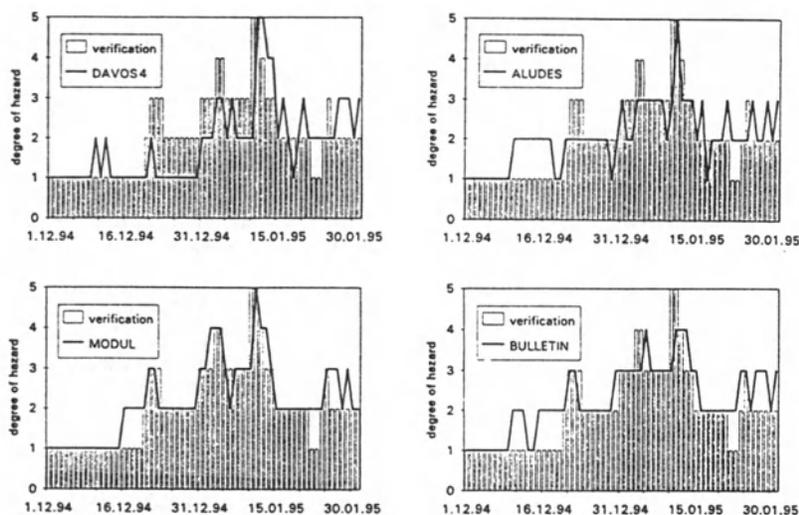


Fig. 1 Daily forecasts of degree of danger (European danger scale: 1 to 5) for a two month period in the region of Davos, Switzerland. The vertical columns indicate the "a posteriori" verified degree of danger per day; the fat lines indicate the forecasted degree of danger of three expert systems and of the avalanche bulletin that is mainly based on the conventional synoptical method.

The model DAVOS4 (upper left) that is a prototype expert system (based on the commercial software CYBERTEK-COGENSYS™), estimates the degree of avalanche danger on the base of 13 weather, snow and snow cover parameters. Even though this simple principally statistically based model had in the last three years an average performance of 63%, it has tremendous problems to reach equilibrium in the early winter period (December 1994). A further weak period is visible from January 10 to 15, 1995, when suddenly with heavy snowfall and strong winds (about 80cm of dry new snow within 24 hours) a very high danger (5) developed. However, the model at least predicted the very high danger.

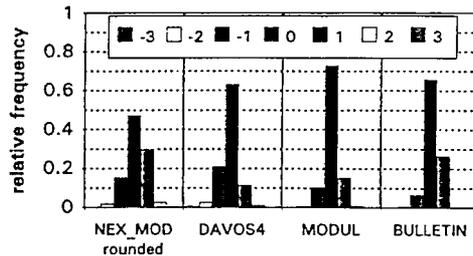
During the first mentioned period (December 1994) the danger was mainly verified by analysing snow profiles and Rutschblock tests, which showed a latent avalanche danger for single skiers and groups of skiers, even so, no avalanche were observed. During the second period the danger was mainly verified by avalanches: whereas on January 10 and 11, 1995 everywhere large, dry avalanches could be observed, on the following days the number and size of avalanches decreased drastically and from January 14, 1995 on no spontaneously released avalanches were observed. From January 15, 1995 Rutschblock tests performed in various avalanche slopes yielded Rutschblock degrees of 5 (second or third jump) rather than 4 (first jump). This short excursion into the details of the verification procedure shall give an example of the applied

type of reasoning.

All other methods presented in Fig. 1 demonstrate similar problems, although the more rule based model MODUL (below left) that includes detailed snow cover profile analysis does not much deviate from the verification during December 1994 and proceeds quite nicely in January. The avalanche bulletin shows a certain deficiency during the intensive snowfall and wind period (10. to 15. January 1995) probably due to a avalanche data lack during that exceptional period of snowfall, fog and adverse observation conditions. The model ALUDES that is a hybrid expert system integrating neural networks and rules (Schweizer et al., 1994) shows an impressive behaviour during the intensive snowfall/wind period indicating high or very high danger.

A complete representation of the performance of the two models (DAVOS4 and MODUL) based on the CYBERTEK-COGENSYS™ software, the nearest neighbour models NEX_MOD (operationally used by the avalanche warning service) and for comparison the avalanche bulletin is given in Fig. 2.

Fig. 2. Performance of different forecast models and of the avalanche bulletin. The average deviation from the verification during three winter periods (1991/92 to 1993/94) is given for the Davos region in the eastern Swiss Alps. The Next MOD Model (an adjusted version of Nearest Neighbours-method) delivers average values of danger degrees, which are rounded for representation reasons.



CONCLUSIONS

Verification of avalanche danger, i.e. verifying daily forecasted danger degrees is a difficult task, anyway much more difficult than to verify an avalanche activity index or an "avalanche day". For this there are three main reasons:

- 1) Avalanche danger is not a directly measurable quantity, not even "a posteriori".
- 2) The main danger factors, the "avalanches" can often not be observed due to fog, snowfall or snow drifting.
- 3) Even if avalanches could be observed continuously in time and space, the potentially dangerous situations *low* or *moderate* danger (European scale 1 or 2) are often not traceable by avalanches. This is especially true when skier presence for triggering is low and/or when avalanche triggering by explosives is not operational.

Avalanche danger verification is a deductive process which integrates all the above mentioned principles and limitations. It is not possible to base one of the most important steps in avalanche forecasting, namely the verification solely on observed avalanches. Therefore we may conclude that every forecasting group should dispose of at least one test region where on one side optimal avalanche observations are guaranteed, on the other side where snowpack testing, test skiing

and artificial triggering is also possible in multiple repetition on all aspects and in various altitude zones. Finally we would like to mention that despite of improved verification procedures and possibly ideal avalanche observations the verification of avalanche danger will always contain an error between 10 to 20 %.

REFERENCES

- Buser, O. 1983. Avalanche forecast with the method of nearest neighbours: an interactive approach. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 8, 155-163.
- Elder, K. and Armstrong, B. 1987. A quantitative approach for verifying avalanche hazard ratings. IAHS Publication 162, 593-603.
- Föhn, P., Good, W. Bois, P. and Obled, C. 1977. Evaluation and comparison of statistical and conventional methods of forecasting avalanche hazard. *J. Glaciol.* 19 (81). 375-387.
- Föhn, P. 1981. Schneefeldsprengungen und Stabilität der Schneedecke. In: Einfluss der Schneefeldsprengung auf die Erosion, Kolloquium München 2./3. Juli 1980, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München, 51-64.
- Föhn, P. 1985. Das Schweizerische Lawinenbulletin - Eine Interpretationshilfe für den Benutzer. Mitteilung des Eidgenössischen Institutes für Schnee- und Lawinenforschung, Weissfluhjoch-Davos, Nr. 38.
- Giraud, G., Lafeuille, J. and Pahaut, E. 1987. Evaluation de la qualité de la prévision du risque d'avalanche. IAHS Publ. 162. 583-591.
- Judson, A. and King, R.M. 1985. An index of regional snow-pack stability based on natural slab avalanches. *J. Glaciol.*, 31 (108), 67-73.
- McClung, D.M. and Tweedy, J. 1994. Numerical avalanche prediction: Kootenay Pass, British Columbia, Canada. *J. Glaciol.* 40 (135). 350-359.
- Remund, J. 1993 (unpublished). Verifikation der regionalen Lawinengefahrenprognose. Diploma thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Switzerland.
- Schweizer, M., Föhn, P.M.B. and Schweizer, J. 1994. Integrating neural networks and rule based systems to build an avalanche forecasting system. Proc. IASTED Int. Conf.: Artificial Intelligence, Expert Systems and Neuronal Networks, 4-6 July 1994, Zürich, Switzerland.
- Schweizer, J. and Föhn, P.M.B. 1995. Two expert systems to forecast the avalanche hazard for a given region. In: Proceedings of the International Snow Science Workshop, Snowbird, Utah, U.S.A., 30 October-3 November 1994. 295-309.
- Williams, K. 1979. Credibility in avalanche warnings. *J. Glaciol.*, 26 (94), 94.

La prévision départementale du risque d'avalanche : l'exemple de l'Isère

J. Villecrose¹

RESUME

Depuis 1987, la prévision du risque d'avalanche sur les massifs Français est faite par Météo-France au niveau de chaque département. Celui de l'Isère possède une configuration géographique originale: certains de ses massifs sont exposés de plein fouet aux influences Atlantiques tandis que d'autres sont déjà ouverts largement vers le Sud et les influences méridiennes Méditerranéennes. De plus l'altitude des sommets, très variable d'un massif à l'autre, garantit une palette très étendue de conditions nivologiques. Par ailleurs l'environnement scientifique et socio-économique, dont bénéficie le Centre Départemental Météorologique de Grenoble/St.Martin d'Hères chargé de la prévision du risque d'avalanche, confère à ce dernier un rôle particulier aussi bien dans le cadre de la formation des professionnels de la neige (en collaboration avec différents organismes comme l'ANENA) que dans celui de la prévision où il nous revient d'expérimenter les nouveaux dispositifs et modèles développés par le Centre d'Etude de la Neige de Météo-France.

ABSTRACT

Since 1987, the avalanche risk forecast on french mountains has been done by METEO-FRANCE at the level of french "department". In Isère, there is an original geographic configuration: some massifs are directly exposed to the influence of the Atlantic while others are widely opened to Southern ones. Moreover, the height of the summits, varying greatly from one massif to the other, ensures an extensive range of snow conditions. On the other hand, the "Centre Départemental Météorologique de Grenoble/St.Martin d'Hères" responsible for avalanche risk forecast, benefits from scientific and socio-economic environment which gives it a particular role in the training of snow professionals (in collaboration with different organism as ANENA) as well in forecasting. In this field, we have to test new snow models and applications developed by the "Centre d'Etudes de la Neige".

INTRODUCTION

Nous ne reviendrons pas ici en détail sur l'historique et l'organisation de la Prévision du Risque d'Avalanche (PRA) en France (Pahaut, 1991). Rappelons simplement que depuis 1987, ce sont 9 stations météorologiques départementales qui assurent ce service sur leurs zones de responsabilité, et ce, d'une façon quotidienne entre la mi-décembre et la fin avril, le Centre d'Etudes de la Neige (CEN) conservant le rôle de coordinateur technique tout en poursuivant études et développements nécessaires à l'amélioration de la PRA. Enfin, il ne faut surtout pas oublier le réseau nivométéorologique, résultat d'un partenariat exemplaire entre des secteurs publics et privés, qui fournit les données d'observation de base nécessaires à la surveillance du manteau neigeux. La PRA sur les massifs de l'Isère, assurée par le Centre Départemental Météorologique de Grenoble St. Martin d'Hères (CDM Isère), s'insère dans ce contexte tout en possédant quelques originalités liées tout à la fois à la configuration géographique du département, au contexte économique et scientifique de la cuvette Grenobloise ainsi qu'à la contiguïté, dans un même bâtiment, de deux services de Météo-France aux missions différentes mais complémentaires, l'un à vocation opérationnelle (le CDM), l'autre à vocation recherche (le CEN).

¹ METEO-FRANCE/CDM Isère, Domaine Universitaire - 1441, rue de la Piscine - 38406 St.Martin d'Hères - France

UN PEU DE GEOGRAPHIE

La cuvette Grenobloise est entourée de massifs montagneux à "forte personnalité", chacun d'eux étant accessible par les skieurs-citadins dans un délai maximum de 1h30 en conditions de circulation normale.

A l'Ouest et au Nord, les massifs calcaires de la Chartreuse et du Vercors ne culminent en moyenne que vers 2000m. Pour autant, les risques d'avalanche n'y sont pas absents. Exposés de plein fouet aux perturbations océaniques, ces massifs bénéficient d'une pluviométrie importante (de 1500 à 2000 mm en moyenne par an) et, l'hiver, d'un enneigement généralement important relativement à l'altitude moyenne. Le rebord Est du Vercors tout comme celui méridional de la Chartreuse peuvent alors servir de tremplins à de grosses avalanches menaçant, en certains points, des zones habitées. Quant aux skieurs, des accidents récents démontrent que le niveau du risque d'avalanche n'a peu de corrélation avec l'altitude! A contrario, cette altitude modeste permet parfois une amélioration brutale des conditions. Il n'est pas rare en plein hiver qu'un redoux avec pluie jusque vers 2000m soit suivi d'un temps frais et sec, permettant ainsi de passer d'un niveau de risque d'avalanche élevé à un risque faible ou limité...et aux skieurs de profiter d'un "terrain de jeu" sûr.

Au Sud-Est, les massifs cristallins des Grandes Rousses et de l'Oisans culminent eux de 3500 à 4000m du Nord au Sud. Les précipitations y sont nettement moins abondantes (inférieures de moitié à celles des Préalpes), mais ces massifs occupent une position quasiment centrale dans l'arc alpin Français qui les met sur la trajectoire aussi bien des perturbations océaniques que de celles venues de Méditerranée. Si les skieurs-alpinistes ne les fréquentent surtout qu'à partir du printemps, l'infrastructure routière et industrielle, l'implantation de gros domaines skiables et des pentes souvent fortes sur de grandes dénivelées nécessitent une surveillance et une information nivologique permanente, tant du point de vue des risques naturels qu'accidentels (ski hors-piste).

Enfin, entre ces deux entités nettement différenciées, le massif de Belledonne (et son prolongement méridional du Taillefer) possède la particularité d'associer des précipitations de peu inférieures à celles des Préalpes et une altitude relativement élevée (3000m). A portée de main de Grenoble, ce massif présente un caractère tourmenté et "alpin" très prononcé. Du fait de leur faible altitude, très peu d'accès routiers ou de zones habitées sont exposées aux avalanches. Il n'en est pas de même pour les skieurs alpinistes qui, chaque week-end, en parcourent les pentes par centaines.

Tous ces facteurs nécessitent une information nivologique de qualité en direction d'un public randonneur grenoblois constituant peut-être un des "réservoirs" les plus importants d'Europe.

LES OUTILS A NOTRE DISPOSITION...LES CLASSIQUES

Jusqu'à un passé récent, l'essentiel de notre réflexion se faisait à partir des observations effectuées dans les postes du réseau nivométéorologique départemental.

Si ce dernier constitue la base minimale pour appréhender l'état du manteau neigeux et effectuer des prévisions du risque d'avalanche, encore faut-il en optimiser les performances, ce qui repose sur trois priorités:

- Un matériel de mesure performant, homogène d'un poste à l'autre et bien entretenu. Dans l'Isère, le financement est assuré par l'intermédiaire du Conseil Général et de Météo-France.
- Une bonne formation des observateurs, issus pour la plupart des services des pistes, une bonne motivation et de bonnes relations entre observateurs et météo. Ces trois résultats sont obtenus par l'intermédiaire de stages de formation ou de recyclage à l'échelle régionale ou départementale mais aussi par de nombreuses visites techniques en cours de saison. Dans le cas du CDM Isère, cette activité de formation dépasse d'ailleurs largement le cadre des observateurs puisque nous intervenons aussi, sous l'égide de l'ANENA, dans de nombreux stages nationaux servant au recrutement ou à la spécialisation des pisteurs-secouristes.
- Enfin, une implantation judicieuse des postes d'observation suivant les massifs. A savoir, un étagement correct de leur altitude en fonction de celle moyenne des massifs mais aussi une ventilation sur plusieurs orientations des sites de sondage par battage.

Dans l'Isère, le réseau nivométéorologique est constitué actuellement d'une vingtaine de postes d'observations quotidiennes ou bi-quotidiennes, étagés entre 950 et 2590 m d'altitude.

- Pour le Vercors et Chartreuse: 6 postes d'une altitude moyenne de 1200m
- Dans Belledonne et le Taillefer: 4 postes d'une altitude moyenne de 1600m
- Dans l'Oisans et les Grandes Rousses: 8 postes d'une altitude moyenne de 1900m

Le réseau de sondages par battage (effectués une fois par semaine) est constitué de 11 sites, étagés entre 1350 et 2600m, dont 5 exposés au Nord, 3 au Nord-est, 2 à l'Ouest et 1 au Sud.

Enfin ce réseau humain est complété par 5 stations automatique "Nivôse", étagées entre 1700 et 3200m, les données du laboratoire du Col de Porte (Chartreuse, 1350m) interrogeables à distance, comme celles du col du Lac Blanc près de l'Alpe d'Huez (Grandes Rousses, 2700m).



Figure 1: Le réseau nivométéorologique de l'Isère 94-95

LES NOUVEAUX: LA CHAÎNE SAFRAN-CROCUS-MEPR

Premier véritable système d'aide à la prévision du risque d'avalanches, il a été testé opérationnellement dans le cadre de l'assistance de Météo-France pour les J.O. d'Albertville puis dans certains départements comme les Hautes Alpes et surtout l'Isère où nous l'utilisons maintenant de façon régulière depuis trois saisons. Rappelons que ce système, une fois alimenté en variables météorologiques fines (modèle SAFRAN), permet, par l'intermédiaire du modèle CROCUS, de visualiser l'état du manteau neigeux d'un massif le jour J, et ce par tranches d'altitude de 300m et en différentes expositions, soit donc sur des pentes "type" dont on peut faire varier aussi l'inclinaison (Giraud, 1995).

Déjà, à ce stade, cette information nous est très précieuse pour l'analyse et le suivi de la situation puisqu'il nous permet de nous affranchir (en partie) de la contrainte entraînée par la fréquence seulement hebdomadaire des sondages de battage réalisés sur le terrain par les observateurs du réseau nivométéorologique.

La résolution pertinente du modèle quant à l'évolution morphologique des couches, aussi bien en surface que dans le manteau, nous permet d'avoir en permanence des éléments de réponse plus objectifs par rapport aux questions que se pose tout prévisionniste avalanche: comme par exemple le tassement et la densification de la neige récente, les phénomènes d'humidification en situation anticyclonique et de redoux (dans quels versants, jusqu'à quelle altitude et de combien?) ou de métamorphoses de gradient dont on connaît l'incidence ultérieure sur certains déclenchements accidentels de plaque.

Le dernier chaînon du système (MEPRA) propose aux prévisionnistes une analyse (toujours par

tranche d'altitude et d'exposition) en terme de risques d'avalanche, qu'ils soient naturels ou accidentels. Si le traitement de ces derniers était encore jusqu'ici trop rudimentaire pour être réellement informatif (mais les travaux récents de G.Giraud et de J.P. Navarre (C.E.N.) devraient permettre d'avancer), celui des risques naturels semble assez satisfaisant, tout au moins à l'échelle d'un massif, notamment pour les risques liés à la fonte où le modèle permet souvent de bien dissocier les journées classiques de printemps à risque de petites coulées ou d'avalanches ponctuelles, de celles à crue avalancheuse de fonte.

COMMENT S'EN SERVIR ?

Confronté aux résultats du modèle, le prévisionniste avalanche doit éviter deux écueils: leur faire une confiance excessive ou, à l'inverse, les considérer comme quantité négligeable face à la réalité il est vrai fort complexe d'une situation nivologique.

En tout état de cause, les limites du système (dans son état actuel) sont évidentes:

- Pas de prise en compte du vent en terme d'agent mécanique ni de l'état des purges.
- Postulat de base qu'un massif soit homogène en terme de précipitations recueillies. L'expérience quotidienne prouve que les chutes de neige peuvent varier du simple au triple à quelques kilomètres de distance, en fonction de la topographie et de l'exposition au vent.
- Difficultés du module SAFRAN à bien répartir dans le temps les phases liquides et solides des précipitations lors de situations météo marquées par d'importantes variations de l'isotherme 0 dg, notamment l'après-midi et la nuit où le modèle doit "jouer" entre des observations humaines très espacées dans le temps et des données atmosphériques (radio-sondage) à la maille très large.
- Il ne travaille pour l'instant qu'en analyse. Son évolution "prévision", sur laquelle travaille Y. Durand (C.E.N.), est bien sûr très dépendante de la finesse de prévision numérique des paramètres météo sensibles (précipitations notamment).

Ces restrictions mises part, il est évident que la chaîne SAFRAN/CROCUS/MEPRA apporte un plus indiscutable au travail du prévisionniste avalanche départemental.

Pour autant, l'expertise humaine reste encore largement nécessaire. Il convient de confronter en permanence les résultats du modèle aux observations de terrain, qu'elles proviennent directement du réseau ou des informations "en clair" glanées auprès des observateurs patrouillant sur leur secteur. Enfin, une fois ce travail fait, il nous revient de transmettre aux usagers de la montagne, non pas un descriptif exhaustif de stratigraphie par tranches d'altitude et orientation, mais une synthèse susceptible d'orienter leurs prises de décisions.

AUTRES MOYENS NOUVEAUX OU FUTURS

La détection sismique des avalanches, mise en oeuvre dans une optique opérationnelle par le CEN sur 2 sites de l'Oisans, nous a déjà permis de compléter efficacement les observations d'avalanche issues du réseau nivométéorologique et de contrôler nos prévisions en temps réel ou différé (fig2). Etendu à d'autres sites du département, ce dispositif pourrait permettre de mieux identifier et quantifier les crues (ou décroches) avalancheuses, ce que le réseau ne permet que très partiellement.

Enfin, Le modèle PROTEON qui permet d'estimer le transport de neige par le vent. Son utilisation est encore trop récente pour en tirer des conclusions définitives. Sous sa forme actuelle, il sert surtout de "sonnette d'alarme" pour le prévisionniste mais il constitue certainement le chaînon embryonnaire d'une PRA future prenant pleinement en compte les effets du vent.

L'INFORMATION ET L'ASSISTANCE NIVOLOGIQUE

Elle prend essentiellement la forme de bulletins neige et avalanche (BNA) qui sont mis à la disposition du public soit par l'intermédiaire de réponders téléphoniques, soit du serveur minitel de Météo-France. Dans le cadre de la Charte Montagne et du protocole Nivo signés entre Météo-France et la plupart des stations de ski, ces bulletins font également l'objet d'une diffusion systématique auprès des services des pistes et d'un affichage en plusieurs lieux. Leur rédaction intervient chaque jour en début d'après-midi, et ce entre le 15 décembre et le 30 avril. En novembre et début décembre ainsi qu'au printemps (jusqu'au 15 juin), des bulletins (au degré de précision forcément dégradé faute de réseau dense d'observation) sont également diffusés à chaque veille de

week-end, ou à une fréquence plus élevée si la situation le mérite. La chaîne SAFRAN/CROCUS/MEPRA nous est alors d'une aide plus que précieuse.

La présentation et le contenu des BNA a assez largement évolué au fil des années. D'abord purement "sécuritaire", l'adjonction d'une rubrique "conditions d'enneigement" et un soin particulier apporté au descriptif des couches superficielles du manteau neigeux (notamment en cas de situation relativement "calme") représentent autant d'éléments de "confort" susceptibles de permettre au skieur-alpiniste de profiter au mieux de sa sortie. Enfin, depuis deux ans, les BNA se terminent sur une rubrique "Tendance ultérieure des risques" qui donne, en termes volontairement généraux et prudents, une information intéressante à ceux qui partent en montagne pour plusieurs jours.

A ces BNA, il faut ajouter la rédaction d'un bulletin hebdomadaire (chaque Jeudi) dit "de synthèse" qui récapitule les phénomènes marquants de la semaine écoulée et les cumuls de neige fraîche par massif. Depuis cette année, ces deux bulletins sont disponibles sur un répondeur unique et interactif, permettant donc d'accéder facilement aux informations nivologiques du département de son choix.

En outre, signalons que certains des nivologues du CDM Isère participent également (en collaboration avec des agents du CEN) au fonctionnement d'un organisme appelé "Point Focal Alpes" et chargé de rédiger des bulletins d'alerte (à destination des CIRCOSC) en cas de situations nivologiques critiques (risque 5), de répondre aux demandes de renseignement de la part des médias ou de dispenser avis et conseils (si le besoin s'en ressent) auprès des nivologues départementaux Alpins.

Si l'essentiel de notre activité est tournée vers la production de ces différents bulletins qui s'adressent aussi bien aux skieurs de montagne et de hors-piste qu'aux stations de ski et, plus généralement, à tous les organismes chargés de la sécurité en montagne, de nouvelles demandes d'assistance plus particularisée se font jour, dont celle liée au développement des courses de ski-alpinisme. Ce type d'assistance requiert des nivologues une bonne connaissance du terrain et de sa pratique.

DES BESOINS NOUVEAUX

Les compétitions de ski-alpinisme connaissent en France une vogue croissante depuis quelques années. Celle de la Belle Etoile, première de la saison puisque se déroulant fin janvier, possède aussi l'originalité d'être la seule se déroulant à proximité immédiate de l'agglomération grenobloise. Elle utilise les pentes variées et souvent abruptes du massif de Belledonne/Les 7 Laux, avec comme point de départ la station de ski du Pleynet. Le choix du parcours final fait l'objet de mûres réflexions en fonction des conditions météo et neige du moment et des jours passés. C'est bien sûr ici qu'intervient l'équipe des nivologues du CDM Isère.

En fait, notre assistance commence deux semaines environ avant la date de la course. Car il s'agit déjà d'appréhender au mieux l'état du manteau neigeux sur les différents versants susceptibles d'être empruntés par les compétiteurs, c'est à dire pour nous de passer d'une connaissance à l'échelle d'un grand massif, celle qui nous permet de rédiger les bulletins neige et avalanches (BNA), à une échelle beaucoup plus locale. Cet affinage n'est rendu possible que grâce à des mesures complémentaires sur le terrain (sondages par battage essentiellement) effectuées soit par nous-mêmes soit par les montagnards locaux (certains d'entre eux sont aussi observateurs nivo-météo). Les solutions proposées par la chaîne SAFRAN/CROCUS/MEPRA, même imparfaites, nous sont également précieuses pour le suivi des conditions.

Au fil des jours, la situation nivologique évolue et fait l'objet de briefings réguliers de notre part aux organisateurs, réunions toujours très enrichissantes où se confrontent les connaissances et expériences de chacun. Quatre jours avant la course, c'est l'heure des grandes décisions. Parmi les cinq ou six parcours possibles le jour J-4, il faut essayer de prévoir lequel le sera le jour J.

En 94, notre expertise avait poussé les organisateurs à un report de 24h et à ne pas trop emprunter les versants Sud à priori fort suspects. Résultat, des conditions météo parfaites et aucun incident à déplorer dans une période pourtant délicate (six morts par avalanche en Savoie). Cette année, la météo rigoureuse (mais associée à de très bonnes conditions d'enneigement) a fait s'orienter très tôt vers un parcours plus "moyenne" que haute montagne. Choix assez pertinent si l'on sait qu'à peine 24h après la course, une grosse avalanche descendait l'intégralité de la combe empruntée l'année précédente par près de 150 concurrents.

Meteorological and snow conditions, avalanches and safety in Bulgarian mountains

*Nivométéorologie, avalanches et sécurité
dans les montagnes bulgares*

M. Mikhnevsky¹

RÉSUMÉ

Les montagnes de la Bulgarie étant relativement à proximité des Alpes sont mal connues. On présente ici leurs caractéristiques géomorphologiques et leurs conditions climatiques.

Au début de l'hiver, on mesure des températures relativement basses avec un gradient de température assez grand. Le manteau neigeux est mince et le plus souvent instable sur les pentes herbeuses. C'est la saison des avalanches insidieuses qui causent les accidents aux skieurs ayant l'impression qu'il y a peu de neige.

En plein hiver, le manteau neigeux est significatif et il y a des avalanches de neige fraîche dues à la métamorphose destructive.

La fin d'hiver et le début de printemps sont caractérisés par une radiation solaire forte et les avalanches de neige mouillée, due à la métamorphose de fonte.

On présente une analyse comparative des accidents d'avalanches en Bulgarie et les travaux de sécurité qu'on doit organiser.

ABSTRACT

Unlike the Alps, Bulgarian mountains are not so famous. Here we present their geomorphological and climatic conditions.

At the onset of winter, the temperatures are relatively low and there is a considerable temperature gradient in the snow depth. The snow cover is thin and very often unstable on the slopes overgrown with grass. This is the time of the insidious avalanches that surprise skiers deceived by the small amount of snow.

In midwinter the snow cover is deep and avalanches are triggered by the destructive metamorphism of the new snow.

The end of winter and the beginning of spring witness strong solar radiation and avalanches from wet snow, caused by the melting metamorphism.

A comparative analysis of avalanche accidents in Bulgaria is presented and activities aimed at improving the safety in the mountains are suggested.

INTRODUCTION

Bulgaria is situated at a relatively low geographical latitude (between 41°18' and 44°12'), and the altitude of Bulgarian mountains reaches 2 925 m. Bulgaria is a country in which the risk of avalanches cannot be ignored. The statistics of accidents caused by avalanches reveals that for the last 60 years the casualties are not less than a hundred people.

Bulgaria is a country that has all sorts of relief including plains, medium and high mountains. Practically, the places with an altitude above 800 m have an area of 30 000 km² mainly

¹National Institute of Meteorology and Hydrology, Bulgarian Academy of Sciences,
66 Tzarigradsko chausse Blvd., 1184 Sofia, Bulgaria- Tél : 359 266 14 81 - Fax : 359 288 44 94

distributed among four mountains: Stara Planina (Balkan), Rhodopes, Rila and Pirin, virtually occupying more than 30% of the territory of Bulgaria.

The synoptic observation network in Bulgaria has five mountain meteorological stations: Moussala (2925 m), Botev (2376 m), Tcherni Vrach (2286 m), Snezhanka (1950 m) and Mourgash (1687 m), situated on the main peaks of the mountains (two in Stara Planina, and one in each of Rila, Vitoshka and Rhodopes). At present, there are also 18 climatic posts (stations). The synoptic stations work continuously, but the majority of them were built between 1932 and 1936. They are supplied with electricity, but the facilities and the equipment are very obsolete.

As yet, there is no network of snow-meteorological posts in Bulgaria. We hope that directors and mayors of mountain resorts begin to realise the necessity of adapting the weather forecasts to the mountainous regions, as well as the need of forecasting avalanche risk.

Nowadays, measures are taken to realise a project of a mountain network, consisting of 12 automatic stations, connected by modern telecommunications equipment.

The highest Bulgarian mountains Rila and Pirin, situated in the South-West part of the country, have an alpine relief related to ancient glaciations. These are the most avalanche-hazardous regions of Bulgaria. Exaration and accumulative relief forms, cirques, channels, etc. create excellent conditions for avalanche activity. "Green islands" are widely spread on the slopes, and the phenomenon of plant inversion is also observed.

Rila has a dome-like morphological structure and radial river valleys. Beside the erosion glacier forms - cirques and U-type valleys, there are also accumulative forms - moraines, reaching 1100 m. The main crests of Rila reach a height of 2600-2900 m. Normally, in the high parts of the mountain there is a continuous snow cover from the beginning of November, the maximum is reached by the end of March, and some snow-drifts live to see the new snow. At appropriate atmospheric circulation, snowfalls are possible in the high parts even at the end of August. Rila holds the first place by the number of avalanche victims in Bulgaria - 50% of the casualties. To a large extent, this could be attributed to the popularity of the region - 70 km from Sofia and 60 km from the nearest airport.

In the valley of Rilska river, at an altitude of 1000 m, the Rila Monastery is situated, famous for its architecture and history. Its annals are the first chronicles of avalanche disasters in our country.

Pirin mountain, considered to be the most beautiful in Bulgaria, is situated meridionally in the South-West part of the country, between the valleys of Struina river and Mesta river. Its Southern slopes reach the border with Greece. Its Northern part is a Karst crest with an altitude of 2700-2900 m. The steep slopes of Pirin witness the biggest avalanches in Bulgaria. Some of them fall annually and even have their own names. About 30 years ago, in two successive years the Bezbog hut was destroyed by avalanches.

Stara planina (the Balkan) is the most popular Bulgarian mountain. It crosses Bulgaria from the West to the East and separates it into two parts. It has a chain morphological structure (a part of the Himalayan-Alpine chain), with steep slopes to the North and South and alpine character in some regions. The Balkan is intersected by a dozen of important highways and three railway lines. The highest passes are at an altitude of 1300-1500 m. Presently, they are overloaded because of the embargo against former Yugoslavia, diverting the car traffic between Central and Western Europe and Asia through Rumania and Bulgaria, and in particular, through the bridge across the Danube and the Balkan passes. Fortunately, the latter can suffer avalanche problems only under very special conditions - very heavy snowfalls and strong winds.

The Rhodopes mountain has a massive morphological structure and extend over a vast area (15000 km² are on Bulgarian territory). The mountain crests have different heights and orientation and are genetically linked to Rila and Pirin. The Rhodopes crests are extensive and

rounded and only in the highest parts between 2000 and 2200 m there are traces of avalanche activity.

Vitosha mountain is a small massif with the highest peak Tcherni Vrach that is only 15 km away from Sofia. In spite of the small number of avalanche-hazardous places - several channels and slopes away from the ski-runs - Vitosha is not safe for the numerous skiers and tourists from the capital near-by.

Table 1 shows the average monthly and yearly air temperatures over the Northern slopes of the Rila mountain. The average air temperature on the Moussala peak is -3.1°C . The average monthly temperature is positive only during four months of the year. The average monthly wind speeds are between 10.5 m/s in February and 4.9 m/s in July. The average annual wind speed is 7.5 m/s.

The average annual precipitation on Moussala peak is between 1000 and 1300 mm, and the average monthly precipitation is between 35 mm in September and 110 mm in April and May. Fig.1 shows the depth of the snow cover on the Northern slopes of Rila (in the region of Moussala) every ten days of the winter months at different altitudes.

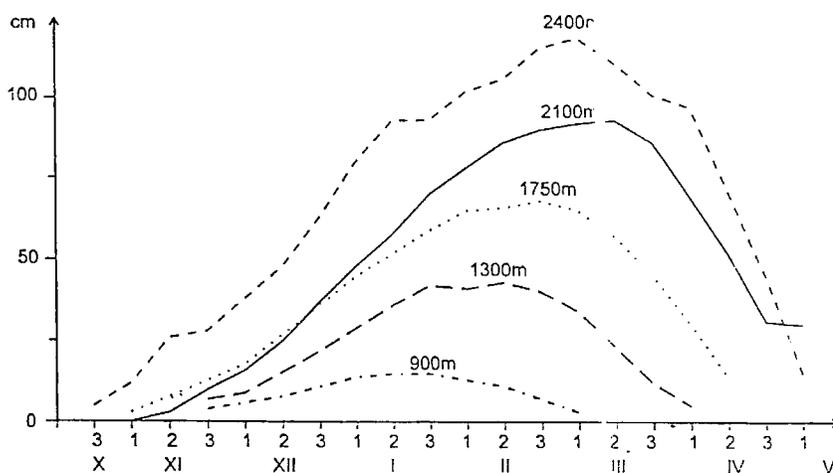


Fig.1. Average depth of the snow cover every 10 days on the Northern slopes of Rila at different altitudes

According to the climatic regioning of Bulgaria by Sabev and Stanev, based on precipitation regimes, Bulgarian mountains are characterised by mountainous climate in the European continental zone with a Mediterranean influence. In terms of precipitation, there are two zones - a lower one between 1000 and 2000 m altitude with precipitation between 700 and 960 mm, and a higher one above 2000 m altitude with annual precipitation between 950 and 1250 mm. In both zones the maximum is in April and June and the minimum is in September and August.

Differentiation of avalanches in Bulgaria by genetic and morphological features is quite difficult. Above all, Bulgaria is located in a transient climatic zone. Besides, most of the avalanche processes take place simultaneously in different geomorphologic regions. The transient zone between 2000 and 2200 m is critical with respect to the behaviour of some meteorological elements, e.g. temperature, that, on their turn, govern the processes of metamorphism in the snow cover. Nevertheless, it can be claimed that 80% of the avalanches are from new snow.

In the surroundings of Malyovitsa (Rila) (Mikhnevsky and Tsenkova, 1985; Mikhnevsky, 1994) where for several years there is a small station for snow studies, there are channels in which after

Table 1. Average monthly and annual air temperatures on the Northern slopes of Rila

Site	Altitude (m)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Annually
Moussala Peak	2925	-10.9	-10.8	-9.0	-5.2	-1.0	2.3	5.0	5.3	2.6	-1.0	-4.9	-6	-3.1
Moussala Hut	2393	-7.4	-7.3	-5.5	-1.6	2.8	6.2	8.6	8.7	5.8	2.1	-1.4	-5.2	0.5
Beli Iskar Dam	1895	-5.0	-4.4	-2.3	1.5	5.8	9.2	11.2	11.4	8.5	4.4	1.3	-2.5	3.3
Sitnyakovo	1742	-4.6	-3.8	-1.8	2.8	7.3	10.8	13.1	13.0	9.6	5.4	1.4	-2.3	4.2
Borovetz	1346	-4.6	-3.2	-0.8	4.6	9.5	13.0	15.2	14.9	11.3	6.5	2.0	-2.1	5.5
Samokov	1029	-3.4	-1.6	1.5	7.2	12.0	15.3	17.4	17.1	13.3	8.4	3.7	-0.9	7.5

every snowfall small surface-layer avalanches with a volume of 500 m³ fall that normally do not reach the bottom of the valley and are not dangerous. Mass triggering of that kind is observed after every bigger snowfall followed by a warm sunny day. In stable cold weather avalanche triggering is considerably less frequent, but, if any, the avalanches of the slab type.

The characteristic features of avalanches in Bulgarian mountains are published in our previous works (Mikhnevsky and Tsenkova, 1985; Mikhnevsky, 1994; Mikhnevsky, 1994). Most generally speaking, there are several periods of higher avalanche danger, related to different genetic types of avalanches. The middle and end of December are characterised by relatively cold weather and normally there is a thin snow cover on dry grass. The avalanches triggered at that time have small volumes (such was the avalanche that killed 11 young alpinists in 1965). At the end of January and the first half of February there is considerable snow cover and "new snow" avalanches with destructive metamorphism and medium volume are triggered. The end of March and especially April witness stronger solar radiation, there are frequent snowfalls, the snow becomes dense with many radiation crusts. As a rule, the avalanches are from wet snow, subject to melting metamorphism and provoked by melting of the surface layer.

According to statistical data, for the last 40 years fifteen people have been hit annually by avalanches. Fortunately, 70% of them are rescued thanks to their own or friends' efforts. The relatively low number of victims is due to the fact that there are no settlements above 1300 m altitude, the ski resorts are also at low altitudes, there are few industrial objects, ski touring, ski alpinism away from the ski runs are not popular, there are no avalanche accidents on roads and populated areas. The victims are mainly alpinists and tourists.

To our great satisfaction, for the last 10 years the number of avalanche casualties has fallen to 1-2 person annually, and for the seasons 1992-93 and 1993-94 there are no victims. The reasons for that decrease are improvement of preventive activity and qualification of people practicing mountain sports. The last several years were not rich in snow following the regional draughting in the whole Northern part of the Balkan peninsula.

I am sure that the number of casualties can be further decreased if up-to-date means are used. So far, the equipment for locating avalanche victims is scarce and alpinists and tourists do not use it. It is mandatory only for competitions in ski-alpinism and during actions of the rescue teams.

Compared to Alpine countries, the avalanche accidents in Bulgaria are not numerous. However, while the majority of avalanche victims in the Alps are among mountain skiers and off-ski run skiers, in Bulgaria the victims are still only alpinists and tourists. The expected boom in the development of winter tourism will increase substantially the number of avalanche accidents and that makes rescue activities against avalanche very pressing.

REFERENCES

1. Sabev (L.), Stanev (Sv.), 1959 - Climatic regions in Bulgaria, *Proceedings of the Institute of hydrology and meteorology*, vol.V.
2. Mikhnevsky (N.), 1993 - Aperçu des données climatologiques pour la région de Moussala *Observatoire de montagne de Moussala OM2*, pp.83-98.
3. Mikhnevsky (N.), Tsenkova (A.), 1985 - The avalanche-hazardous valley of Maliovitsa river and its microclimatic features, *Proceedings of the 4th all-union meeting on avalanches*, Prielbrusie.
4. Mikhnevsky (N.) 1994 - Les avalanches dans la vallée de la rivière Maliovitza - une vallée typique de la partie nord de Rila. *Observatoire de montagne de Moussala OM2*, pp.59-64.
5. Mikhnevsky (N.), 1994 - Neige et avalanches en Bulgarie, *Neige et avalanche*, pp.24-26.

Premiers éléments pour une prévision numérique du risque d'avalanche au cours de la journée du lendemain

Y. Durand¹, L. Merindol¹, S. Michoud²

RESUME

Le but du travail présenté est d'étudier deux méthodes d'élaboration de champs météorologiques prévus afin de prolonger l'estimation numérique quotidienne du manteau neigeux en test à Météo-France. On testera dans un premier temps la qualité du modèle de prévision météorologique ARPEGE adapté aux Alpes. On essaiera ensuite de faire tourner le module d'analyse météorologique en montagne SAFRAN en mode prévision. La méthode utilisée est celle des journées analogues; c'est à dire que l'on recherche dans le passé une situation qui "ressemble" le plus à celle prévue pour le lendemain. On utilise ensuite les observations de cette situation passée de concert avec les paramètres prévus par ARPEGE afin d'y apporter le plus de détails possible de petite échelle. Les premiers résultats vont montrer que l'utilisation directe d'ARPEGE est possible pour la plupart des paramètres mais que les situations analogues sont également utiles pour répartir et normaliser les champs de précipitations prévues à 24h.

ABSTRACT

This work shows two possible ways to use an analysis system of the current meteorological conditions as a tool to provide the same quantities for the next day. This analysis system computes hourly meteorological variables over all the French Alps massifs and initializes afterwards a snow numeric model. The proposed ways are first to adapt the French NMP model ARPEGE or secondly to use analogue situations of the past. The preliminary results validate the direct use of ARPEGE, but the analogue method is interesting for distributing and normalizing the 24h forecasted rainfalls.

INTRODUCTION ET ETAT DE L'ART

La connaissance aussi précise que possible de l'état du manteau neigeux, tant dans ses caractéristiques physiques que dans sa stratigraphie, est un des points importants de la Prévision du Risque d'Avalanche (PRA) hors des domaines sécurisés. Le système actuel opérationnel à Météo-France repose principalement sur une analyse aussi détaillée que possible du manteau neigeux (grâce aux données journalières et hebdomadaires du réseau nivo-météo) et sur son extrapolation pour les jours à venir. Cette dernière opération est réalisée par le prévisionniste nivo-météo qui doit réaliser la synthèse manuelle entre l'évolution de la situation météo (prévue numériquement par le modèle ARPEGE (Courtier et al., 1991) puis interprétée et adaptée localement) et les conséquences induites sur le couvert neigeux.

Depuis plusieurs années le Centre d'Etudes de la Neige de Météo-France a développé une suite de programmes scientifiques permettant une estimation en temps réel de l'état du couvert neigeux (paramètres physiques et stratigraphie) et des risques avalancheux qu'il présente sur les principales orientations des différents massifs alpins avec une finesse verticale d'environ 300m

¹ Météo-France CNRM/CEN, 1441, rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères Cedex F.

² IUT2 Dépt. STATISTIQUE, Bât. des Sciences de l'Homme, BP47X 38040 Grenoble Cedex 9 F.

(Fig. 1). Cet ensemble, actuellement en test pré-opérationnel, est composé de plusieurs modules. SAFRAN (Durand et al., 1993) fournit une estimation horaire des conditions météo (température, vent, humidité, précipitations et phase, rayonnement solaire direct et diffus, rayonnement atmosphérique descendant) nécessaires au bilan énergétique en surface du manteau neigeux. CROCUS (Brun et al., 1992) utilise ces données pour calculer l'évolution énergétique et massive des différentes couches du manteau neigeux ainsi que leurs stratigraphies. MEPRA (Giraud, 1992) gère ensuite l'estimation des risques naturels et accidentels d'avalanche.

Cette chaîne est maintenant bien validée tant pour l'exploitation quotidienne (JO92, test depuis 3 ans dans des stations météo de montagne) que pour la recherche et les études climatiques (Martin et al., 1994). Elle sera bientôt utilisée opérationnellement dans les stations montagnes de Météo-France. Une des principales limitations, qui restera alors dans son emploi, est qu'elle ne permet que de suivre la situation nivo-météo au "jour le jour" (dès que les observations sont disponibles) sans l'anticiper et par là sans pouvoir faire de réelles estimations numériques pour les journées à venir.

Le travail présenté vise à fournir pour la journée en cours et la nuit suivante une estimation des paramètres météo adaptée aux zones montagneuses et cohérente à la fois avec l'analyse quotidienne du manteau neigeux et avec le choix du scénario météo prévu. Cet ensemble permet de prolonger dans le temps l'estimation numérique de l'état du manteau neigeux et d'en estimer les risques.

La principale difficulté réside dans la finesse spatiale (verticale et horizontale) requise qui dépasse les possibilités actuelles des modèles de prévision numérique. On cherchera donc à affiner ces dernières soit directement soit par l'utilisation d'observations du passé.

LES DIFFERENTS OUTILS UTILISES

La démarche adoptée consiste à garder intact les modules CROCUS et MEPRA, mais à les initialiser de manières différentes en "jouant" avec SAFRAN.

Dans un cas SAFRAN fonctionne sans aucune observation et sert uniquement à interpoler les champs d'ARPEGE prévus de 6 heures à 30 heures d'échéance sur les massifs d'étude (rappelons qu'en fonctionnement "analyse" il fait de même avec des échéances plus courtes et qu'il les affine ensuite avec les observations). L'avantage de cette méthode est son entière compatibilité avec les champs initiaux (pour la "nivo") et prévus (pour la "météo"). Mais, d'un autre côté, la finesse d'ARPEGE sur l'horizontal (env. 35 km), cohérente avec sa représentation du relief, peut mener à des biais systématiques et à un certain lissage de même que certaines de ses paramétrisations fonctionnant en zone montagneuse. La série de résultats obtenus sera appelée "ARPEGE".

La seconde méthode, dite (et appelée) des "ANALOGUES" consiste à rechercher dans le passé une situation "ressemblante" à la prévision que nous possédons pour la journée à venir et ensuite à utiliser les observations de cette journée sélectionnée dans notre estimation des heures futures. Cette méthode n'est pas nouvelle et a déjà été utilisée avec succès sur de plus larges domaines géographiques (Duband, 1981). SAFRAN sera donc de nouveau utilisé, mais sur une date du passé. Au contraire de la méthode précédente, celle-ci n'assure pas implicitement l'homogénéité entre les prévisions météo "officielles" et le scénario météo joué (qui est la situation analogue, donc proche mais jamais identique à la prévision du jour) qui conditionne l'évolution du manteau; d'où un risque potentiel d'évolution aberrante ou divergente nivo/météo. Les champs météo initiaux et le résultat de l'analyse doivent donc être harmonieusement mélangés avec la prévision de référence et l'état initiale, mais il n'y a pas de garantie formelle.

Pratiquement nous allons rechercher la journée analogue dont les champs météo analysés ressemblent le plus à la trajectoire prévue d'ARPEGE (minimisation globale sur 5 échéances, de 0 à 30 heures) sur un domaine géographique d'environ 400x600 km couvrant les Alpes

Françaises et leurs massifs d'étude. (cf. Fig. 1). La minimisation porte sur les champs de géopotential à 500 et 700 hPa, la température et l'advection thermique à 700 hPa. Les opérateurs utilisés sont la différence quadratique sur le champ, les gradients et le rotationnel ainsi que la corrélation; ils sont appliqués directement sur les champs sans utilisation d'opérateurs de combinaison statistique. Le fichier des situations d'analogues commence à l'hiver 1981; cette trop courte période est une limitation actuelle de notre système mais l'obtention de champs et d'observations antérieures à 1981 devrait bientôt être réalisée. De même l'exiguïté du domaine spatial est atténuée par le fait que utilisons une minimisation globale sur 5 échéances d'ARPEGE. Dans les validations, nous nous servons de séries de référence. La première correspond à SAFRAN en mode normal analyse (cf. note § préc.); nous l'appellerons "REFERENCE". La seconde est équivalente à la première mais fonctionne sans observation; elle réalise donc seulement l'adaptation d'ARPEGE pour des échéances de 0 ou 6h aux massifs d'analyse. Cette série que nous appellerons "GUESS" permet à la fois de mesurer l'impact des observations dans SAFRAN (par comparaison avec REFERENCE) et de mesurer la dégradation de la prévision (par comparaison avec ARPEGE).

RESULTATS OBTENUS ET VERIFICATION SUR SITES

Différentes expériences numériques ont été conduites depuis août 93. Les principaux paramètres simulés ont pu être vérifiés sur deux sites instrumentés d'altitude: le Col de Porte dans le massif de la Chartreuse à 1340m sur un site plat fonctionnant toute l'année, le Col du lac Blanc dans le massif des G^{des} Rousses (sur le domaine skiable de l'Alpe d'Huez) à 2800m sur site plat et fonctionnant uniquement durant l'hiver. Les valeurs modélisées rapportées à ces sites ne sont que des interpolations en altitude et exposition dans les massifs respectifs; les caractéristiques fines des deux sites ne sont donc pas pris en compte, ce qui ajoutera un bruit de fond aux résultats.

Les résultats sur une partie de l'année 93-94 sont présentés dans les Tableaux 1 et 2 pour les deux sites. Les valeurs tabulées sont les corrélations entre champs simulés (nos 4 expériences des § préc.) et observés sur les sites sauf pour la nébulosité qui est déduite des valeurs de rayonnement solaire; la fréquence de vérification est soit horaire (marquée "H"), soit journalière ("J"). En plus des paramètres météo habituels (aux fréquences "H" ou "J") nous avons comparé le rayonnement IR atmosphérique atteignant le sol ("Rayt IR") ainsi que le rayonnement solaire global vers le bas ("Rayt Solaire"). La variable "Bilan radiatif" est un autre élément de contrôle plus adapté à la neige; elle est égale à $\text{"Rayt IR"} + 0.2 * \text{"Rayt Solaire"}$ ("0.2" correspondant à un albédo "moyen"). Enfin le "Rayt Solaire" au pas "J" est en fait une moyenne sur les 24h du rayonnement solaire global (mesuré ou calculé) normalisé par le rayonnement solaire clair théorique. Cette variable est plus représentative que le rayonnement solaire global qu'il est facile de calculer la nuit, ce qui favorise le score de vérification de cette dernière.

Au Col de Porte (Tab. 1) beaucoup de vérifications tournent à l'avantage des simulations ARPEGE sauf pour le diagnostic journalier du rayonnement solaire tandis qu'au pas horaire les deux résultats sont assez proches. La cause réside peut-être dans les meilleures nébulosités relatives(!) des analogues; à ce propos il faut préciser que dans l'expérience ANALOGUE la constante solaire est initialisée pour le jour réel de la simulation. On notera également les piteux scores concernant le vent et l'humidité, mais ce site de mesure entouré d'arbres est réputé pour ses vents très faibles. L'analyse (REFERENCE) améliore toujours son ébauche (GUESS) grâce à l'information apportée par les observations qu'elle arrive à distribuer dans l'espace. On remarquera que les précipitations journalières de REFERENCE sont bien meilleures que la répartition horaire car l'analyse est effectuée sur les quantités en 24h qui sont ensuite redistribuées au pas horaire.

Paramètre	Fréq.	REFERENC E	GUESS	ANALOGUES	ARPEGE
Température	H	0,979	0,952	0,709	0,946
Module Vent	H	0,605	0,556	0,412	0,545
Humidité Rel.	H	0,727	0,594	0,423	0,552
Rayt. IR	H	0,703	/	0,426	0,561
Rayt. Solaire	H	0,909	0,865	0,838	0,859
Précipitations.	H	0,743	/	0,288	0,392
Nébulosité	H	0,506	0,364	0,380	0,344
Bilan Radiatif	H	0,843	/	0,716	0,744
Rayt. Solaire	J	0,794	0,605	0,759	0,589
Précipitations	J	0,955	/	0,448	0,692

Paramètre	Fréq.	REFERENCE	GUESS	ANALOGUES	ARPEGE
Température	H	0,972	0,958	0,833	0,945
Module Vent	H	0,615	0,675	0,545	0,676
Humidité Rel.	H	0,669	0,554	0,513	0,577
Rayt. IR. (*)	H	0,807	/	0,530	0,671
Rayt. Sol. (*)	H	0,950	0,913	0,896	0,877
Précipit. (*)	H	/	/	/	/
Nébulosité (*)	H	0,547	0,308	0,356	0,412
Bilan Rad. (*)	H	0,888	/	0,758	0,779
Rayt. Solaire	J	0,830	0,615	0,792	0,647
Précipit. (*)	J	0,866	/	0,489	0,562

Tableau 2: Comparaisons (corrélations) entre valeurs analysées/prévues et observées sur le site du Col du Lac Blanc (2800m, plat). Voir les explications dans le texte (en "grisé" les meilleurs résultats relatifs).
* Observations non validées complètement.

Au Col du lac Blanc (Tab. 2) on retrouve le même phénomène concernant le rayonnement solaire malgré un résultat contraire pour la nébulosité. L'hypothèse actuellement envisagée concerne cependant le diagnostic nuageux (surtout pour les nuages hauts) qu'élabore l'analyse à partir des champs du modèle. On remarquera également que l'expérience ARPEGE est meilleure que la GUESS (malgré la différence d'échéance du modèle) pour l'humidité et les champs qui en résultent (nébulosité); ceci semble provenir de la gestion du cycle de l'eau dans le modèle de prévision qui n'est pas stabilisée dans les premières échéances ("cut-off"). Les résultats du vent sont également à noter; on y remarque que l'analyse détériore son ébauche (GUESS) qui a la même piètre qualité que dans ARPEGE. Ceci n'est sans doute pas dû à la mauvaise qualité des observations de vent (parfois plus estimées que mesurées) mais à leur forte représentativité locale que le schéma statistique de l'analyse n'arrive pas à filtrer.

Le résumé de ces premières conclusions (encore en cours d'études) est synthétisé dans le tableau 3 excepté pour les scores de précipitations; ceux-ci seront développés dans le prochain § selon d'autres méthodes. Il est en effet difficile de disposer de séries fiables de précipitations observées pour le Lac Blanc mais ce n'est pas le cas au Col de Porte. Sur ce dernier site on a mesuré 1063 mm sur 175 jours tandis que les ANALOGUES sur les mêmes journées en prévoient 807. De même sur un sous-ensemble de 121 journées (incluses dans les 175) on a mesuré 957 mm tandis qu'ARPEGE en prévoyait 801. Dans un autre ensemble disjoint de 212 jours on a mesuré 1348 mm alors que SAFRAN (analyse) en diagnostiquait 1240. Nous illustrons ici un point délicat des validations et comparaisons, car nous ne disposons pas forcément des prévisions complètes d'ARPEGE pour toutes les journées de l'année.

RESUME:	Col de Porte	ARPEGE	> ANALOGUES (sauf pour Rayonnement Solaire journalier et Nébulosité)
	Col du Lac Blanc	ARPEGE	> ANALOGUES (sauf pour Rayonnement Solaire horaire et journalier)
		ARPEGE	> GUESS pour Humidité et les champs qui en dépendent. (PB "cut-off" du modèle)
		GUESS	> REFERENCE pour le Vent

Tableau 3: Résumé (excepté pour les précipitations) des vérifications effectuées au Col de Porte et au Col du Lac Blanc.

VERIFICATIONS SPATIALES DES PREVISIONS DE PRECIPITATIONS

La variabilité spatiale et temporelle des précipitations en montagne fait qu'il est très difficile (surtout avec un outil comme SAFRAN travaillant à l'échelle du massif et ARPEGE à une échelle encore plus grande) de valider nos modèles directement avec les observations (on l'a vu au § préc.). Nous avons donc pris SAFRAN en mode "analyse" comme référence (ce qui est plus ou moins justifié par les mesures du Col de Porte du § préc.) mais ce qui nous permet d'étendre le domaine de vérification à l'ensemble des Alpes sur 23 massifs d'étude (Fig. 1). Les figures 2 et 3 nous montrent une grande similitude entre les analyses SAFRAN et les prévisions ANALOGUES à 1800m. Ce n'est pas un hasard mais provient du fait que ce sont des résultats du même programme fonctionnant soit sur des dates réelles soit sur des dates analogues et ces figures illustrent seulement sa climatologie interne caractérisée par différents types de temps (Bénichou et al., 1987). Par contre ARPEGE (Fig. 4) montre des extrêmes sur les massifs qui correspondent à un relief élevé dans sa propre représentation (et supérieure en moyenne à 1800). L'étude temporelle de nos différentes séries a montré (figure non présentée) une rupture du comportement de la série ARPEGE suivie d'une nette amélioration depuis fin août 1994. Cela correspond à une modification du réglage du modèle. Nous avons donc étudié, depuis cette date, deux tables de contingence, une à 2 classes ("Pluie/Non-pluie", cf. Fig. 5) et une autre à 5 classes ("Non-pluie" + 4 classes de précipitations, cf. Fig. 6 pour les limites de classes). On y constate que les ANALOGUES sont meilleurs sur les massifs frontaliers, là où ARPEGE a un relief élevé qui gêne son diagnostic à basse ou moyenne altitude (cf. § préc.) mais que ce dernier est supérieur ailleurs. Le tableau 4 (ci-dessous) présente un court résumé de ce paragraphe.

RESUME:	Cumuls par Massifs	ANALOGUES	> ARPEGE
	Etude par classes	ARPEGE	> ANALOGUES (sauf pour les massifs frontaliers élevés)

Tableau 4: Résumé des vérifications effectuées sur les prévisions de précipitations.

CONCLUSIONS

Ces études préliminaires sont une "n-ième" démonstration de la difficulté de la prévision météorologique, surtout en zone montagneuse. Une première conclusion (un peu hâtive à l'heure actuelle) pourrait être qu'avec les outils actuels le meilleur compromis semble être l'utilisation directe d'ARPEGE après adaptation par les opérateurs d'interpolation de SAFRAN pour tous les champs à l'exception des précipitations. Pour ces dernières, une renormalisation des sorties ARPEGE est nécessaire et le champ obtenu pourrait être combiné avec le champ ANALOGUE

selon des poids dépendant du massif; un algorithme sur l'occurrence des précipitations pourrait aussi être mis en avant.



Figure 1. Liste des Massifs

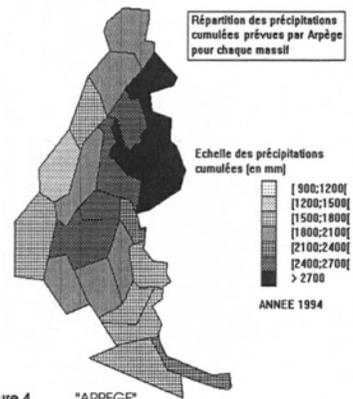


Figure 4. "ARPEGE"

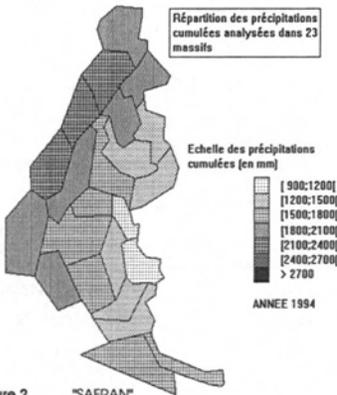


Figure 2. "SAFRAN"

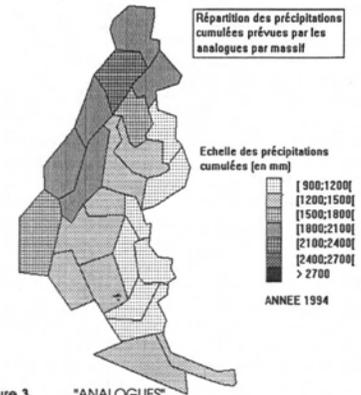


Figure 3. "ANALOGUES"

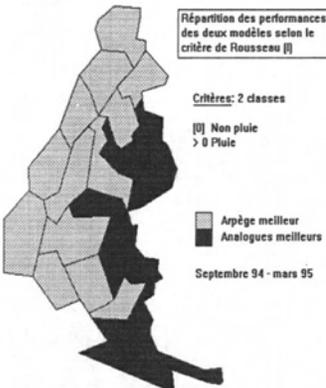


Figure 5. Test avec 2 classes

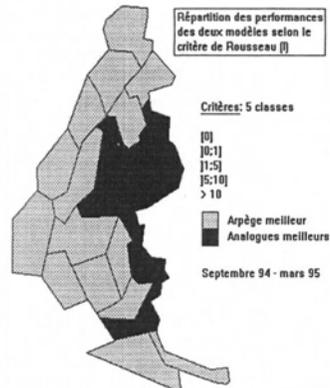


Figure 6. Test avec 5 classes

REFERENCES:

- Bénichou P., Le Breton O. (1987) "*Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques*", La Météorologie VII(19), p 23-34.
- Brun E., David P., Sudul M., Brunot G. (1992) : "*A numerical model to simulate snowcover stratigraphy for operational avalanche forecasting*", J. of Glaciol., Vol 38, N°128, p 13-22.
- Courtier P., Freyrier C., Geleyn J-F., Rabier F. et Rochas M. (1991) "*The Arpege project at Météo-France*", ECMWF Seminar Proceedings 9-13 septembre 1991, Vol 2, p193-232.
- Duband D. (1981) : "*Prévision spatiale des hauteurs de précipitations journalières*", La Houille Blanche, juillet/août 1981, p 497-511.
- Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E. (1993) : "*A meteorological estimation of relevant parameters for snow models*", Annals of Glaciol., Vol 18, p 65-71.
- Giraud G. (1992) : "*MEPRA : an expert system for avalanche risk forecasting*", Proceedings of the International snow science workshop, 4-8 oct 1992, Breckenridge, Colorado, USA, p 97-106.
- Martin E., Brun E., Durand Y. (1994) : "*Sensitivity of the French Alps snow cover to the variation of climatic variables*", Annales Geophysicae, 12, p 469-477.

Limits of wind-tunnel modeling of snow accumulations

Intérêts et limites de la modélisation physique en soufflerie du transport de neige par le vent

F. Naaim-Bouvet¹

ABSTRACT

Drifting snow poses a lot of problems, especially snowdrift, cornices and slabs. Therefore it is necessary to develop protection systems and small scale modeling in wind tunnel is a mean of studying such protection systems. Principles of physical modeling seems to be simple : its only a question of reproducing snowstorms on a small-scale model. However, validity of full-scale prediction (drift patterns, speed and storm duration) from small-scale modeling by using similarity criteria poses a problem because the large number of modeling parameters cannot be satisfied simultaneously. Small-scale modeling in wind-tunnel allows study most cases. But there are two important problems : snowdrift formation on steeply slope (particle cohesion) and storm duration estimation (unsaturated particle concentration profiles). Outdoor modeling with snow and snowdrift numerical simulation will contribute to physical modeling in wind tunnel and extend it .

RESUME

Le transport de la neige par le vent pose de nombreux problèmes tant du point de vue de l'érosion que du dépôt : formation de congères, corniches et plaques à vent. Il est donc nécessaire d'étudier différents dispositifs de protection.

Dans ce contexte un moyen d'étude s'impose : la modélisation physique en soufflerie. Le principe en est simple, il s'agit de reproduire en soufflerie un épisode de transport de neige.

Mais cette apparente simplicité cache une réalité plus complexe : l'estimation des grandeurs réelles (forme des congères, vitesse et durée des tempêtes) nécessite l'utilisation de critères de similitude, qui, pour des raisons propres à la modélisation ne peuvent être respectés simultanément.

Certes la modélisation permet de répondre à la majeure partie des cas envisageables en ingénierie: profils routiers, implantation de bâtiments,... Cependant deux problèmes essentiels apparaissent lors de la modélisation en soufflerie : la formation d'accumulation sur de fortes pentes (problèmes de cohésion des particules) et l'estimation de la durée de tempête (difficulté d'obtention de la saturation en particules). La modélisation physique à l'extérieur et la modélisation numérique du transport de neige permettront d'apporter des éléments de réponse et complèteront ainsi la modélisation physique en soufflerie.

NOTATION

L, l : characteristic horizontal dimension (m), **H, h** : characteristic vertical dimension (m), **z₀** : aerodynamic roughness height (m), **z₀'** : aerodynamic roughness height in saltation (m), **U** : speed (m/s), **u_{*}** : surface friction speed (m/s), **u_{*th}** : threshold friction speed (m/s), **U_F** : particle terminal speed (m/s), **σ** : particle density (kg/m³), **γ** : particle bulk density (kg/m³), **ρ** : fluid density (kg/m³), **ν** : kinematic viscosity (m²/s), **g** :

¹ Division Nivologie, CEMAGREF, 2 rue de la Papeterie
BP 76, 38 402 Saint-Martin-d'Hères, Tel : (33) 76-76-27-22

gravitational acceleration (m/s^2), A : planform drift area (m^2), t : time(s), τ^l : viscous shear stress (kg/ms^2), τ^t : turbulent shear stress (kg/ms^2), m : denotes model, p : denotes prototype

INTRODUCTION

Although physical modeling in wind tunnel can solve many practical problems (Naaim 1995) the main purpose of this article is to show the limits of its use.

Many experiments have been performed by several scientists (Anno 1984, Ivversen 1981, Isuymov 1992, Kind 1975, Tabler 1980,...). Difficulties lie in the disagreement between authors concerning the most important and appropriate sets of modeling requirements. This paper does not present a comparison between different requirements because this approach was given in a previous article (Naaim 1994). But problems are met even when using best suited modeling criteria. Therefore they are described in this paper.

EXPERIMENTAL DEVICES

In order to show the limits, we have carried out :

- a synthesis of full-scale measurements (*six years of snow-fence testing in a flat field open to wind in the Massif Central*)
- wind tunnel simulations (*in our laboratory CEMAGREF/France*)
- outdoor modeling with snow (*in collaboration with University of Chicoutimi / Quebec*)
- outdoor modeling with sand (*in collaboration with University of Agadir / Morocco*)

DRIFT PATTERN

Previous experiments have shown the validity of the simulation requirement proposed by Anno u_* / u_{*th} (where u_* is the friction speed (m/s) and u_{*th} is the threshold friction speed (m/s)); this requirement will be used subsequently.

The main criticism of wind-tunnel simulation is that it does not allow formation of cornices or snowdrifts on steep slopes because of the lack of particle cohesion. In this case, one must carry out outdoor modeling with snow (*figure 1*) :

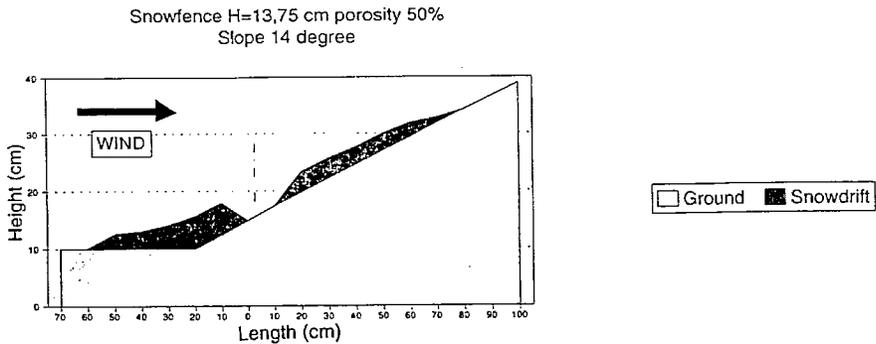


Figure 1 : Snowdrift behind snowfence on a steep slope (outdoor modeling with snow)

But we face other problems concerning drift patterns even if they are not as obvious. So, if we compare full-scale measurement and wind-tunnel simulation (*drift behind 50% porous fence with a bottom gap of $0,2 H$, where H is the height of snow fence, figure 2*), two important differences appear :

- the model upwind drift is almost non-existent,
- the model lee drift although similar is shorter. The same differences were noticed by Iversen when he compared his wind tunnel simulation with full-scale measurements by Tabler.

This difference could be explained by both of the following phenomena : blowing snow with a wind direction differing from prevailing direction and snowfall without wind (*these produce an effective geometrical characteristic change of snowfence and a geometric characteristic change of snowdrift*). However, these hypotheses can be ruled out from outdoor modeling we have done with snow and sand (*figure 3*).

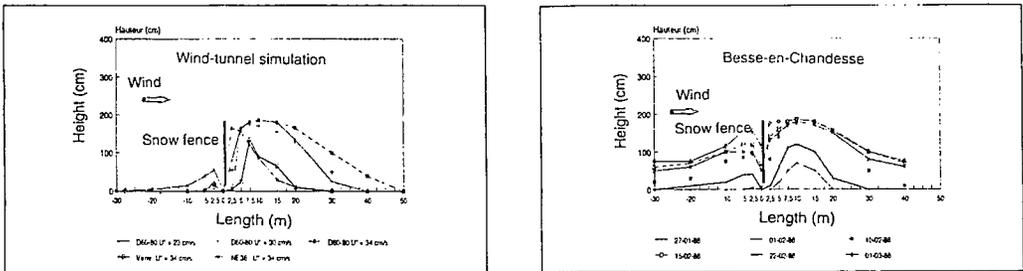


Figure 2 : Full-scale measurements compared to wind-tunnel simulation (scale 1/50) for a 50% porous fence with a bottom gap of $0,2H$

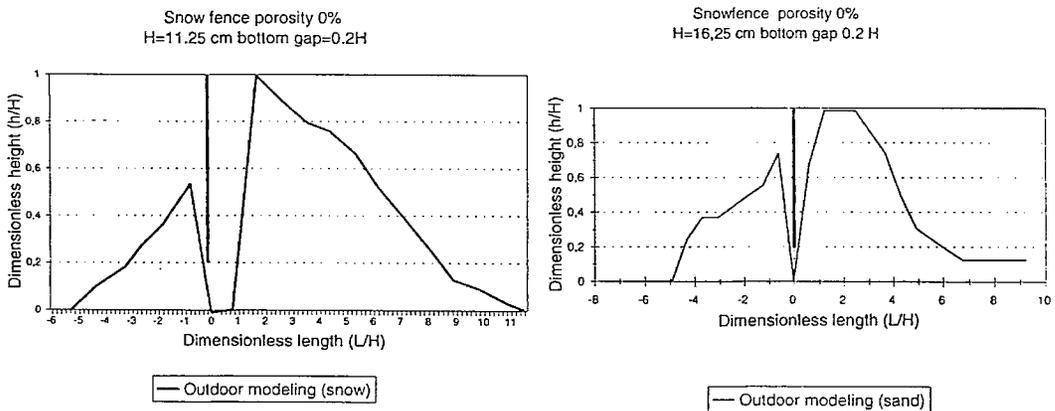


Figure 3 : Outdoor modeling with sand and snow drift behind 0% porous fence with a bottom gap of $0,2 H$

In the first case, the short duration of the experiment (*few hours*) allows us to obtain a wind direction perpendicular to the snowfence without snowfall. For this time, we observe a sizeable upwind snowdrift. Therefore, we can make the assumption that the difference between full-scale measurement and wind tunnel simulation is due to the lack of particle cohesion (*angle of repose*). But the second experiment (*figure 3 with sand*) carried out with sand proves the contrary (*however it is necessary to be careful about ripples which can falsify results in the case of outdoor modeling*). So the difference between full-scale and wind tunnel upwind drift may be due to a problem of flow

simulation. So on that point we agree with Isyumov and Mikitiuk (*Isyumov 1992*) who define two cases for similarity of building aerodynamics : sharp-edged bodies (*turbulent separated flow*) and curved shapes for which full similarity is never achieved.

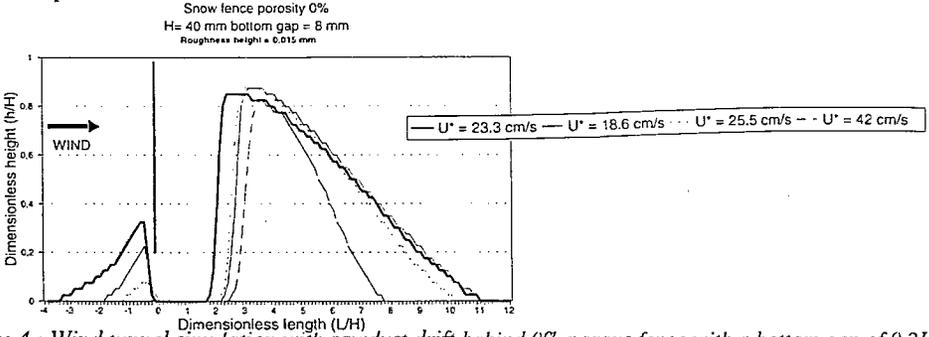


Figure 4 : Wind tunnel simulation with sawdust drift behind 0% porous fence with a bottom gap of 0.2H

STORM DURATION

Concerning storm duration time scale proposed by Kind $(\frac{t_m}{t_p} - \frac{\gamma_m H_m / U_m}{\gamma_p H_p / U_p} - \frac{H_m / u_{*m}}{H_p / u_{*p}})$ or

Tabler $(\frac{t_m}{t_p} - \frac{\gamma_m H_m / U_m}{\gamma_p H_p / U_p})$ cannot represent storm duration because U_p and U_m are particles or

wind speeds and not erosion or deposition speeds. The time scale proposed by Iversen is truly innovative, because he takes mass rate of saltating material into account. However, the fetch (*length of ablation zone*) is fixed to 1,4 m in his experiments (*Iversen 1982*). Therefore it is possible that particle saturation is not reached for this length. Indeed, in the opposite case, we feel intuitively that it would be necessary to introduce in the function \mathcal{F} , a new variable that is the length of ablation zone on which mass rate of saltating material depends.

$$\frac{d(A/L^2)}{d(u_* l/L)} = \frac{\rho u_*^2}{\sigma g H} (1 - \frac{u_*}{u_{*c}}) \mathcal{F}(\frac{U(H)L}{v}, \frac{h}{H}, \frac{l}{L}, \frac{z_o}{H}, \frac{z'_o}{H}, \frac{\rho}{\sigma}, \frac{U_F}{u_*}, \frac{u_*^2}{gH})$$

This has been confirmed by experiments we performed in a wind tunnel.

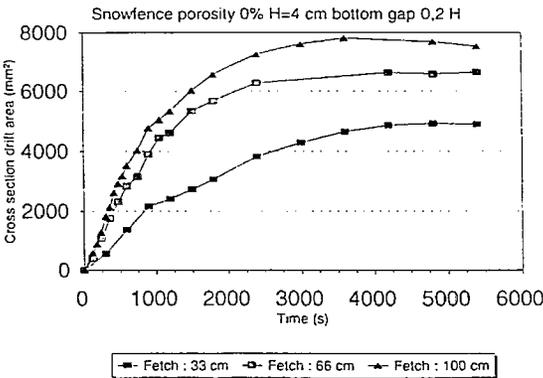


Figure 5 : Influence of the ablation length

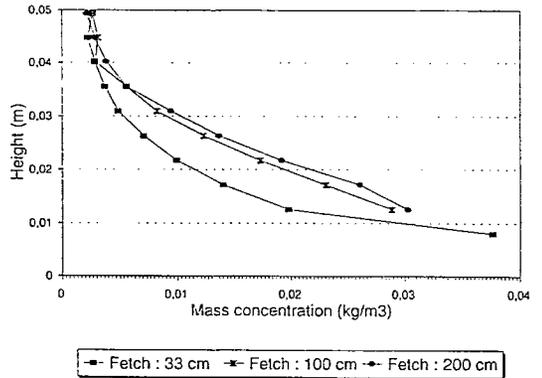
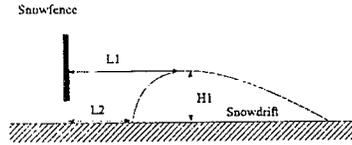


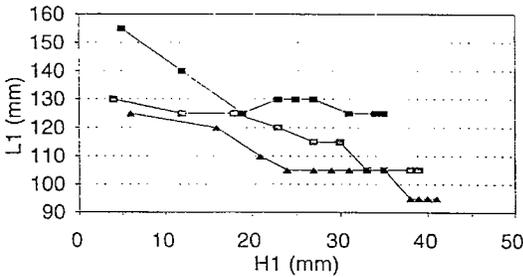
Figure 6 : Vertical concentration profiles obtained using images analysis (*Martinez 1993*) for different fetches

When vertical concentration profiles differ, all things being equal (*velocity at the beginning of working area*), we notice that the evolution of cross sections in the drift area as a function of time are not the same. In fact, it is difficult to a posteriori know if vertical concentration profiles were obtained during Iversen's experiments.

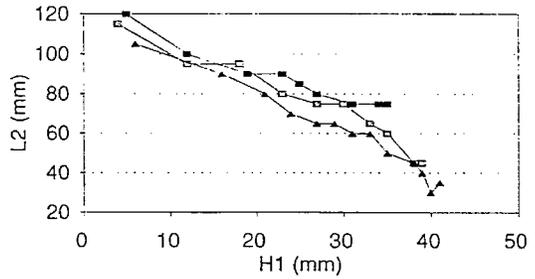
Furthermore we notice that the different cross section areas are not equivalent. Therefore, for the same velocity, drift pattern is a function of concentration profiles. This can be seen by examining pattern characteristics.



Snowfence porosity 0%
H=4 cm bottom gap 0.2 H



Snowfence porosity 0%
H=4 cm bottom gap 0.2 H



■ Fetch : 33 cm □ Fetch : 66 cm ▲ Fetch : 100 cm

■ Fetch : 33 cm □ Fetch : 66 cm ▲ Fetch : 100 cm

Figure 7 : Variation of drift pattern as a function of concentration profiles

An explanation may be provided by the modification of the wind profile by saltating grains (*momentum extracted by the grains during saltation*). It is necessary to modify the Reynolds equations with an additional force term (*Anderson and Haff 1992*).

$$\rho \frac{dU_i}{dt} - \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau'_j}{\partial x_j} - F_i$$

with F horizontal body force per unit volume on wind due to the presence of saltating particles. Thus local modification of wind profile leads to drift pattern modification. Moreover, the importance of F can be demonstrated with the following experiment : we carry out a drift simulation in a wind tunnel with a specific speed at the beginning of working area. After the formation of drift, particle feed is turned off but speed stays the same. It appears that the drift pattern is modified; drift length decreases whereas impact threshold velocity is smaller than the fluid threshold velocity. Thus, it is possible that a shortening drift may be due to increase in fluid speed.

Planform drift area around a fence
without porosity and bottom gap

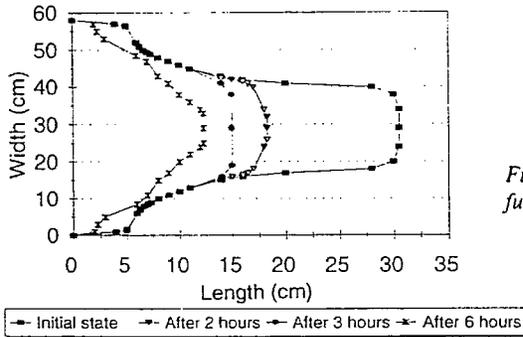


Figure 8 : Variation of planform drift area as a function of time

CONCLUSIONS

Small-scale modeling in wind-tunnel allows study of the majority part of conceivable cases. Wind tunnel modeling had been carried out since the thirties. However several problems appear : snowdrift formation on steeply slope (*particle cohesion*), lee drift (*flow*) and storm duration estimation (*unsaturated particle concentration profiles*). This leads to inaccuracy of results. Outdoor modeling with snow and snowdrift numerical simulation will contribute to physical wind tunnel modeling and extend it.

REFERENCES

- Anderson (R.) and Haff (P.), 1991 - Wind modification and bed response during saltation of sand in air, *Aeolian Grain transport I Mechanics, Acta Mechanica*, pp. 21-51, Springer Verlag.
- Anno (Y.), 1984 - Requirements for modeling a snowdrift, *Cold Regions Science and Technology*, 8, pp. 241-252
- Isyumov (N.) and Mikitiuk (M.), 1992 - Wind tunnel modeling of snow accumulations on large-area roofs, *Second International Conference on Snow Engineering*, pp. 181-193
- Iversen (J.), 1982 - Small-scale modeling of drifting snow phenomena, *Wind tunnel Modeling for Civil Engineering Applications, Cambridge UNIVERSITY Press*, pp 522-545.
- Kind (J.), 1975 - A critical examination of the requirements for model simulation of wind induced erosion/deposition phenomena such as snow drifting, *Atmospheric Environment, Vol.10*, pp. 219-227
- Martinez (H.) and Naaim (M.), 1993 - Détermination expérimentale et numérique du profil vertical de concentration dans un écoulement chargé, *proceedings of "11^{ième} congrès français de mécanique"*, vol. 2, pp. 289-292
- Naaim (F.), 1995 - La protection du col d' Engayresque (A75) : Modélisation en soufflerie et à l'extérieur de la formation de congères, *Annales des Ponts et Chaussées n°73*, pp. 27-41
- Naaim (F.), 1994 - Comparison of requirements for modeling snowdrift in the case of outdoor and wind tunnel experiments, *Proceedings of European Geophysical Society published in "Surveys in Geophysics"*
- Tabler (R.D), 1980 - Self similarity of wind profiles in blowing snow allows outdoor modeling" *Journal of Glaciology, vol.26, n°94*, pp. 421-434

The author gratefully acknowledges the assistance of A. Bouddour, M. Ikenne and F. Sarret in the collection of field data and thanks University of Quebec (*Chicoutimi*) and University of Agadir for their collaboration.

Avalanches : prévisibles ou imprévisibles ?

R. Lambert¹

RESUME

Pour les avalanches comme pour les autres risques naturels, l'imprévisibilité du phénomène est souvent utilisée comme premier argument de défense alors que la prévisibilité est de plus en plus recherchée, voire prouvée, par les sinistrés ou leurs assureurs.

Le recours systématique à la "force majeure" et au concept de fatalité, a tendance à se discréditer de lui-même, face à l'expérience acquise sur ces 3 dernières décennies et grâce aux nombreux outils d'investigation dont nous disposons aujourd'hui.

Cependant l'auteur propose de distinguer la notion de prévisibilité temporelle (prévoir la date, le moment) quasi-impossible à réaliser, de la prévisibilité spatiale (prévoir le lieu, l'emprise réelle) plus facilement réalisable, mais dépendant largement de la fiabilité des zonages réalisables.

ABSTRACT

Avalanches : foreseeable or unforeseeable ? As with many other natural risks, the unforeseeability of avalanches is often used as a first line of defence, while in fact the foreseeability of an avalanche is being studied more and more and can almost be proved.

The systematic use of "an act of God" or "Fate" tends to discredit itself when confronted with the experience gained over the last decades and the many techniques of investigation we now possess.

However the author proposes to distinguish between a foreseeability in time (= forecast the date or the moment) which is almost impossible, and a spatial foreseeability (= forecast the place and tracks), much easier to realize, but which depends largely on the reliability of pre-established zoning.

Pour les avalanches comme pour les autres risques naturels, l'imprévisibilité du phénomène est souvent mise en avant comme premier argument de défense, alors que la prévisibilité est de plus en plus recherchée (et éventuellement prouvée) par les sinistrés, les familles de victimes, ou leurs assureurs. Nombre d'expertises d'avalanches reposent désormais sur cette question manichéenne.

Cette présentation se place essentiellement sur le plan de l'expertise judiciaire.

¹ Expert en nivologie près les Tribunaux
F - 74230 Thônes, Tél. (33)50-02-19-25

Aussi il apparaît nécessaire de lancer sereinement quelques grands axes de discussion, voire de concertation, entre tous les interlocuteurs concernés :

- les élus de communes de montagne, les professionnels de terrain (responsables de sécurité des pistes, moniteurs, guides...)
- les administrations, les scientifiques et chercheurs, les juristes
- les usagers qui peuvent être les victimes.

La discussion s'impose car nous avons l'expérience de quelques hivers, grands millésimes à haut risque tels que 1970, 1978, 1981, 1984, 1991 ; mais aussi parce que le net progrès des connaissances scientifiques décrédibilise le concept simpliste de fatalité ; mais encore parce que le nombre des procédures engagées semble augmenter ; enfin parce que la fréquentation de la montagne est en augmentation constante (ski hors piste et de randonnée, stations et routes à haute altitude), ce qui accroît le risque.

Nous devons préalablement dissiper le malentendu sémantique sur le terme-même de prévisibilité : "prévisible, c'est ce qui peut être prévu". Prévoir, c'est penser, d'après certaines données, qu'un fait futur est très probable ; dans une autre acception du mot, c'est concevoir, envisager un fait comme possible (c'est-à-dire éventuel, envisageable). Il n'est pas précisé à quelle échelle de temps on se réfère. Pour une avalanche, phénomène "climatique", on pourrait raisonnablement proposer d'envisager de reprendre tous les phénomènes produits sur une période de 200 ans.

Le recours aux archives historiques, les outils traditionnels (analyse des conditions nivométéorologiques et prise en compte des précipitations extrêmes (Lambert, 1979, p.14, p.155), analyse des bassins d'alimentation potentiels, de la topographie, des traces dans la végétation et géomorphologiques, modélisation par maquettes) ou plus modernes (approches statistiques, détermination par modèles numériques, modélisation mathématique...) permettent une approche de plus en plus efficace dans la démarche d'expertise.

Deux cas réels, jugés quelques années auparavant, nous montrent la tendance qui pourrait se dessiner : l'avalanche du 10 février 1970 à Val d'Isère sur le centre de vacances de l'UCPA, et l'avalanche du 2 février 1978 au Tour (Chamonix) sur les Combes.

Dans ces deux cas, l'imprévisibilité fut mise en avant de façon péremptoire dès le début en particulier pour l'UCPA (Vié le Sage, 1989, p.45 et suivantes). Pour le Tour, affaire moins médiatisée, la question de la prévisibilité fut même au centre de la mission confiée aux deux experts par la Cour d'Appel.

Dans les deux cas, la prévisibilité du phénomène fut prouvée, établie, en particulier par l'antériorité historique (avalanche de 1917 pour Val d'Isère ; avalanches de 1966 et 1808 au Tour). La fatalité, l'imprévisibilité du phénomène, la notion de force majeure furent donc rejetées. ;

Dans ces deux cas, comme dans d'autres, des lacunes ou des erreurs d'appréciation ont conduit à autoriser des constructions en zone réelle de risque, certes d'une probabilité de retour faible parfois.

Mais quelle occurrence du phénomène a-t-on fixé, accepté au départ ?

Les cartes d'avalanches existantes, les divers zonages ont souvent été utilisés dans les démonstrations ; ils ont pu avoir une incidence sur les décisions prises par les Tribunaux et leur qualité a pu influencer, voire déterminer le résultat final, car ces documents sont, même s'ils sont incomplets, considérés officiellement comme LA référence en la matière. Des cartographies plus "prospectives" du risque permettraient peut-être d'atténuer ces difficultés (Lambert, 1992, p.88).

Observons enfin que le recours à la fatalité , pour se dédouaner de certaines responsabilités mal assumées au départ, revient à une négation, peu crédible, des apports du passé (faits historiques, archives...) et du présent (activités de recherche, connaissances scientifiques, expérience acquise).

Pour mieux cerner notre approche, il convient de distinguer les risques affectant des zones fixes, connues, des risques survenant sur des domaines de montagne vastes, où la variabilité des altitudes et des expositions des versants compliquent nettement l'approche. On peut suggérer une gradation dans nos capacités techniques, objectives, à établir éventuellement la prévisibilité d'un phénomène :

- Il est relativement aisé d'établir la prévisibilité d'une avalanche pour des sites construits, dotés d'un historique, couverts par des cartes, menacés par un phénomène précis.

- A l'opposé, pour les domaines de montagne étudiés avec moins de précision (certains massifs préalpins n'ont pas de couverture type CLPA), nous concevons la très grande difficulté de prévoir toutes les coulées susceptibles de se produire sur de multiples versants. Dans ce cas, on peut plus facilement suspecter un risque que l'affirmer. S'il est un domaine où le risque zéro n'existe pas, c'est bien celui-ci.

- Le cas intermédiaire est représenté par les pistes de ski balisées et le hors-piste de proximité , pour lesquels le risque d'avalanche est régulièrement étudié et mieux connu. Et le PIDA, document précis, est un document de référence, important en cas de procédure.

Même si des efforts de recherches particuliers (Bolognesi 1995) (Duclos 1994) portent aujourd'hui sur la prévision avalanche pour les domaines skiables, en l'état actuel de nos moyens, nul ne peut prévoir à coup sûr, la survenance imminente de chaque coulée sur un domaine skiable ; et, pour l'instant, on ne peut que purger à titre préventif (en espérant un résultat positif), fermer, interdire ou évacuer pour un temps (avec toutes les difficultés de crédibilité que ce type de décision engendre, on le sait).

Aussi, nous pourrions proposer de distinguer la notion de prévisibilité "temporelle" (savoir prévoir la date, le moment, l'heure...) qui est quasi impossible à réaliser pour l'instant, de la notion de prévisibilité "spatiale" (prévoir le lieu, le site, savoir apprécier préventivement l'emprise réelle possible au sens d'envisageable) qui est plus facile à établir surtout pour des avalanches touchant les habitations (des hameaux ou des quartiers de stations), et dans une moindre mesure les grandes voies de communication (rail, routes).

Particulièrement pour les constructions, nous avons vu précédemment que nous avons les moyens d'investigations suffisants pour prévenir l'essentiel des accidents, à condition d'avoir la volonté de nous en donner les moyens.

En conclusion, donnons quelques remarques, à titre personnel, en nous fondant sur 14 années de pratique de l'expertise judiciaire :

- la responsabilité des experts (et des contre-experts) est grande puisque la détermination de la prévisibilité ou non d'une avalanche est entre leurs mains ; et l'indépendance absolue de tels acteurs devrait être acquise comme une règle déontologique évidente

- les divergences d'appréciation de la prévisibilité ou non d'un phénomène donné proviennent souvent des mêmes erreurs : mauvaise prise en compte des bassins d'alimentation potentiels, des conditions nivo-météorologiques, des différents types d'écoulements possibles sur un site, des différentes trajectoires possibles d'un même phénomène,... ; un phénomène rare (probabilité de retour 1/100 ou 1/150 ans) est dangereux car on l'oublie.

- les experts pourraient dépasser leur rôle involontaire d'arbitres entre professionnels, élus, administration d'une part et usagers, particuliers d'autre part, et acquérir un rôle de conseillers, c'est-à-dire développer un rôle de prévention plutôt que celui de constat.

L'enjeu est considérable : nous devons tout faire pour prévenir les dégâts matériels, les victimes potentielles et avoir une attitude sécuritaire, de prévention plus efficace car plus volontaire.

BIBLIOGRAPHIE

Bolognesi (R.) 1995 Neige : les deux méthodes de la connaissance, *Vertical* - Hors série n° 1 Skier 1995, p.111

Duclos (A.) 1994 - Les avalanches accidentelles : plaques ou poudre ? *Neige et Avalanches* n° 68, décembre 1994, pp.2 - 6

Lambert (R.) 1979 - *Les phases pluvieuses maximales de saison froide : application aux chutes de neige de forte intensité sur les Alpes Françaises du Nord* - Thèse doctorat 3ème cycle - CNRS ER 30 Grenoble I, 162 p.

Lambert (R.) 1992 - The representation of Foreseeable Natural Risks : a contribution to a new cartography of avalanches, *Theoretical and Applied Climatology* 45, pp. 83-88

Vié le Sage (R.) 1989 - *La Terre en otage*, Paris, Seuil 249 p.

Avalanches d'été, avalanches d'automne, un risque méconnu

J.-P. Zuanon¹

RESUME

On associe souvent les avalanches à la saison hivernale. Pourtant elles peuvent se produire en toute saison, contribuant à alourdir de façon significative les bilans. C'est ainsi que les accidents par avalanche survenus entre le 1er mai et le 15 décembre ont fait 130 morts en 23 ans en France. Cette étude réalisée sur la France, la Suisse et l'Italie montre l'importance quantitative du phénomène et sa grande variabilité d'une année à l'autre, tout comme d'un pays à l'autre. Elle montre aussi que, en règle générale, ces avalanches font plus de dégâts que celles d'hiver. Les deux principales catégories à risques étant les skieurs de montagne et les alpinistes, il est important de développer des actions d'information, de sensibilisation et de prévention (port de l'ARVA notamment) pour réduire ce genre d'accidents.

ABSTRACT

Avalanches do not occur only in winter. There are also summer or autumn avalanches, which may be very dangerous. In France, in 23 years, 130 persons died from avalanche occurring in the period 1.5/15.12. Starting from a study of avalanche statistics in France, Italy and Switzerland, this paper gives an idea of the importance of the phenomenon, often understated. It also points up the fact that these avalanches are generally more dangerous and that mountain-skiers and alpinists are the more exposed people. It is important to undertake a policy of prevention and information.

INTRODUCTION

Lorsqu'on parle d'avalanche, on associe généralement et de façon inconsciente le phénomène à une saison précise, l'hiver et à une activité bien particulière, le ski de montagne. Il est vrai que la majorité des accidents surviennent généralement entre mi-décembre et fin avril mais des avalanches peuvent se produire en d'autres saisons. Comme le montre cette étude, leurs conséquences sont souvent plus graves que celles des avalanches d'hiver. De plus, les skieurs de montagne ne sont pas la seule catégorie de pratiquants de la montagne concernés par ce danger.

Pourtant, le phénomène reste mal connu. Les usagers ne semblent guère conscients des risques d'avalanche encourus en dehors de l'hiver. Quant aux spécialistes s'occupant de prévention (responsables de clubs, d'organismes de secours), ils se sont jusqu'ici penchés sur le risque d'avalanches en saison de ski. Leurs mises en garde et leurs conseils s'adressent essentiellement à des skieurs. Ils n'ont pas encore beaucoup réfléchi sur des messages destinés à d'autres publics exposés à un risque potentiel d'avalanche (alpinistes notamment).

Avant de proposer des actions d'information et de prévention convenablement ciblées, il apparaît nécessaire de répondre à quelques questions :

- quelle est l'importance quantitative du phénomène ?
- quelle est son importance relative par rapport à l'ensemble des accidents par avalanche ?
- existe-t-il des périodes "à risque" ?
- peut-on définir les publics touchés (quelle activité, sportive ou non) ?

¹ Club alpin français, commission nationale de ski. 24, avenue de Laumière 75019 Paris

QUELQUES REGLES DE METHODE

Afin de pouvoir obtenir des résultats comparables d'un pays à l'autre et de donner une certaine rigueur à cette étude, quelques conventions ont été définies au préalable.

- On n'a retenu que les accidents réels (et non les fausses alertes) ayant entraîné l'intervention de secours organisés. Il n'a pas été possible de prendre en compte les incidents dans lesquels les victimes se sont sorties d'affaire seules ou avec l'aide de leurs camarades.

- On a écarté les accidents ayant entraîné seulement des dégâts matériels, pour ne retenir que ceux dans lesquels il y a eu des personnes emportées.

- En ce qui concerne les chutes de séracs, on s'est efforcé de se conformer à la règle récemment définie par la CISA-IKAR : ne sont prises en considération que celles provoquant ensuite une avalanche et non les seules chutes de blocs de glace. C'est ainsi que l'accident du 28 juillet 1994 au Mont-Blanc n'a pas été retenu.

- La période prise en considération, soit du 1er mai au 15 décembre, correspond en gros à tout ce qui se situe en dehors de la saison de ski. Durant ces sept mois et demi, il n'y a pas de diffusion régulière d'informations nivologiques. Par convention, on désignera cette période sous le terme de "hors-saison".

- Pour ne pas alourdir les résultats, deux variables importantes seulement ont été privilégiées : le nombre de personnes entraînées et le nombre de décès. Sauf exception, les données relatives au nombre de personnes ensevelies et au nombre de blessés n'ont pas été analysées.

Cette étude se base sur les statistiques établies dans trois pays de l'arc alpin. Toutes sont établies pour la période allant du 1er octobre au 30 septembre de l'année suivante.

Pour la France, il s'agit des statistiques rassemblées par l'Anena depuis l'hiver 1971-72 et publiées dans la revue "Neige et avalanches". Elles sont disponibles jusqu'à la saison 93-94 incluse.

Pour la Suisse, on s'est basé sur les rapports de l'Institut fédéral de Davos. Ils vont de l'automne 75 à la fin de l'été 93.

Enfin pour l'Italie, la série s'étend sur une plus brève période puisqu'elle ne couvre que six saisons (de l'automne 87 à la fin de l'été 93). Il s'agit des compte-rendus d'accidents publiés dans la revue de l'AINOVA.

Le nombre d'années de référence variant beaucoup d'un pays à un autre, il n'y a pas matière à faire des comparaisons entre des valeurs absolues. Par contre, on peut travailler sur des valeurs relatives et des pourcentages.

QUELLE IMPORTANCE DANS L'ABSOLU ?

Si l'on fait le total de l'ensemble des accidents par avalanche survenus "hors-saison" dans chacun des trois pays considérés, on obtient les résultats suivants

France (23 ans)	135 accidents ayant provoqué 131 morts	soit environ 5,7 morts par an
Suisse (18 ans)	81 accidents ayant provoqué 95 morts	soit environ 5,3 morts par an
Italie (6 ans)	30 accidents ayant provoqué 42 morts	soit environ 5,7 morts par an

Un autre calcul fait sur une base homogène (la période 87-93, pour laquelle on dispose de données pour les trois pays) fait ressortir une moyenne annuelle assez proche des chiffres précédents. En six ans, 82 accidents imputables à des avalanches hors-saison ont causé 98 morts, soit plus de 16 par an pour l'ensemble des trois pays.

QUELLE EST LA PART DES AVALANCHES HORS-SAISON DANS LE BILAN TOTAL ?

Rappelons d'abord quelques données d'ensemble sur l'importance du phénomène avalanche dans les trois pays considérés.

En France, on a enregistré 881 accidents d'avalanche en 23 ans. 2462 personnes ont été entraînées et 668 sont mortes. Le bilan moyen d'une saison est de 38,3 accidents avec un total de 107 personnes entraînées et 29 décès.

En Suisse, il y a eu 621 accidents en 18 ans. 1804 personnes ont été entraînées et 495 sont mortes. Le bilan moyen d'une saison est de 34,5 accidents, avec un total de 100 personnes entraînées et 27,5 décès.

En Italie, en six saisons, on a totalisé 171 accidents, 454 personnes entraînées et 125 décès. Le bilan moyen d'une saison est de 28,5 accidents, 75,6 personnes entraînées et 20,8 décès.

Pour évaluer l'importance relative des avalanches "hors-hiver", le critère pris en considération est celui du nombre de décès liés à ce type d'avalanche par rapport au nombre total de décès par avalanche.

1971-1994	France	131 victimes sur un total de 668	soit 19,6 %	
1975-1993	Suisse	95	495	19,1 %
1987-1993	Italie	42	125	33,6 %

En Suisse et en France, un décès sur 5 est imputable à une avalanche "hors-saison". En Italie, ce rapport monte à 1 sur 3.

Si l'on reprend la période de référence 87-93, on obtient pour les trois pays un total de 98 décès hors-saison sur 608, soit environ un décès sur 6.

DE GROSSES VARIATIONS INTERANNUELLES

— Pour la France, pays pour lequel on dispose de la plus longue série statistique, on constate que le pourcentage de décès par avalanche "hors-saison" par rapport au total des décès varie de façon impressionnante. C'est ainsi qu'aux 66% de 73-74 s'opposent les hivers 74-75 (0%), 75-76, 83-84, 86-87 et 89-90 (valeurs inférieures à 5%). La tendance à l'accroissement du nombre d'accidents enregistrée entre 1990 et 1993 (on est passé de 21 à 39% puis 43%) n'a pas été confirmée en 94 (10%).

— Il en va de même en Suisse (années extrêmes 76-77 avec 40% et 86-87 avec 0%). Bien qu'il faille manier ces chiffres avec beaucoup de précaution, on est tenté d'opposer la période 83-87 (9 décès en 4 ans soit 2,25/an) à la période récente 87-93 (38 décès en 6 ans soit 6,3/an)

— Les chiffres sont encore plus contrastés pour l'Italie, avec une série en dents de scie : 3% en 87-88, 80% l'année suivante puis 0% en 89-90. On enregistre une nouvelle escalade en 90-91 (36%) suivie d'une année sans dégât puis d'une saison 92-93 catastrophique (79%).

On remarque qu'il n'y a guère de coïncidence entre les courbes des trois pays. Aux années sans accident en Italie correspondent souvent des années avec un lourd bilan en France et en Suisse. Seule, une étude fine des conditions climatiques et nivo-météorologiques ayant prévalu dans les différents pays considérés permettrait d'expliquer les importantes variations interannuelles mises en évidence et, éventuellement, de définir des situations à risque.

ETE OU AUTOMNE ?

France	48 morts par avalanche avant le 15.12	contre 83 après le 30 avril
Suisse	26	69
Italie	17	25

On laissera de côté le cas italien, peu significatif car il porte sur un faible nombre d'années.

Si l'on s'en tient aux résultats des deux autres pays, on constate que la période la plus dangereuse en valeur absolue se situe en été ou, plus précisément entre le 1er mai et le 30 septembre (64% des décès hors-hiver en France, 72% en Suisse). Toutefois, la période de référence étant deux fois plus longue (5 mois contre 2 mois 1/2 pour l'automne), on ne peut pas en conclure qu'il y a proportionnellement plus de morts en été.

Si l'on affine en cherchant à établir des résultats par quinzaine, il apparaît qu'il y a deux périodes critique, quel que soit le critère pris en compte (nombre d'accidents, nombre de personnes entraînées, nombre de décès) : les deux quinzaines précédant et suivant immédiatement la saison de ski, du 1er au 15 décembre et du 1er au 15 mai.

En France, c'est la première quinzaine de mai qui est la plus meurtrière : 35 accidents, 133 personnes entraînées et 27 décès (soit plus d'un accident sur 4 et 20% des décès). Elle est suivie

de la seconde quinzaine de juillet (peu d'accidents, 7 au total, mais très meurtriers, 16 morts au total). Enfin, 23 accidents au cours desquels 71 personnes ont été emportées et 16 sont décédées se sont produits durant la première quinzaine de décembre.

Les dangers d'avalanche en novembre ne doit pas non plus être négligés : 19 accidents ont occasionné 26 décès. Les mois les moins dangereux sont août et septembre (au total 13% des décès).

Pour la Suisse, c'est également durant la première quinzaine de mai qu'il y a le plus de "casse" : 18 accidents ont fait 27 victimes. La première quinzaine de décembre (18 accidents) vient juste après par le nombre de décès (20). La période la moins dangereuse est celle du 16 août au 1er décembre.

Répartition par quinzaine du nombre de décès par avalanche "hors-saison"		
	France	Suisse
1 au 15 oct.	2,3	2,1
16 au 31 oct.	2,3	-
1 au 15 nov.	11,5	-
16 au 30 nov.	8,4	4,2
1 au 15 déc.	12,3	21
1 au 15 mai	20,7	28,4
16 au 31 mai	8,4	10,5
1 au 15 juin	3	6,3
16 au 30 juin	-	3
1 au 15 juil.	6,1	4,2
16 au 31 juil.	12,2	4,2
1 au 15 août	5,4	8,4
16 au 31 août	0,8	3,2
1 au 15 sept.	4,6	-
16 au 30 sept.	2,3	4,2
	100 = 131 vict. en 23 ans	= 95 vict. en 18 ans

Toutes ces données n'ont qu'une valeur très relative. Pour qu'elles prennent tout leur sens, il serait nécessaire de les pondérer en tenant compte de l'importance de la fréquentation de la montagne dans une période donnée. En l'absence d'outils permettant d'évaluer de façon plus précise cette fréquentation, on en est réduit à des approximations. Les quinzaines précédant et suivant la saison "officielle" de ski sont aussi celles au cours desquelles il y a déjà, ou encore, une fréquentation relativement importante et les chiffres enregistrés n'ont rien de surprenant. Plus surprenantes sont les données concernant la "morte-saison", du 1er septembre au 30 novembre. Pour la France, on constate que près d'un décès sur trois par avalanche "hors-saison" se produit durant cette période de très faible fréquentation de la montagne.

QUI EST TOUCHE ?

Le type d'activité exercée par les victimes d'avalanche hors-saison varie en fonction directe de la période considérée : à l'automne, skieurs de randonnée impatients de goûter aux neiges précoces de novembre puis premiers skieurs hors-piste; à la fin du printemps, skieurs de randonnée puis alpinistes. Il s'y ajoute un certain nombre d'usagers de la montagne appartenant à d'autres catégories qui sont a priori moins à risques, comme les chasseurs ou les ouvriers

— En France, ce n'est que depuis 1982 que l'on dispose d'informations sur l'activité des victimes. Sur les 232 personnes emportées, on comptait

113 skieurs de montagne (48,7%)

66 alpinistes (28,4%)

32 skieurs hors-pistes (13,8%)

10 skieurs sur piste (4,3%)

11 autres (dont 3 randonneurs à pied, 3 à skis de fond, 4 sur route, 1 sauveteur)

— Pour l'Italie, sur 109 personnes emportées en six ans, on dénombre
68 alpinistes (dont 63 emportés en été), soit 62,3 %
21 skieurs-alpinistes (dont 9 en automne et 12 en été) soit 19,2%
20 "autres" : 9 spéléologues surpris par d'importantes chutes de
neige dans les Alpes ligures (9 décembre 1990), 6 promeneurs
(automne), 2 chasseurs, un paysan, un garde-chasse (emportés
par des avalanches d'automne) et un ouvrier (avalanche d'été)

On remarque l'absence totale de victimes en ski hors-piste.

— Les chiffres sont aussi parlants pour la Suisse, où l'on dispose d'une plus longue série statistique. Sur 327 personnes emportées, on dénombre par ordre d'importance décroissant

122 skieurs-alpinistes (37,3%)

90 alpinistes (27,5%)

20 skieurs- hors pistes (6,1%)

8 skieurs de piste (en un seul accident survenu au début décembre)

Il faut y ajouter un nombre relativement important (87) de personnes entraînés durant la pratique d'autres activités (26,6%) :

37 personnes ont été emportées sur voie de communication

21 "divers" dont 7 chasseurs, 3 spéléos, 7 ouvriers ainsi que trois

conducteurs d'engins de déneigement ou de ratrac et un promeneur

15 militaires sur un chantier

14 activité non précisée

Pour les trois pays considérés, les deux principales catégories à risques sont les mêmes. Skieurs de montagne et alpinistes représentent entre 65 et 80% du nombre de personnes entraînés. On peut également noter la place relativement importante occupée par le ski hors-pistes en France (plus de 13% des personnes entraînés) et les accidents survenus sur des voies de communication en Suisse (plus de 11%). L'Italie et la Suisse se distinguent aussi par un certain nombre d'accidents touchant des spéléos et des chasseurs.

DES AVALANCHES PLUS MEURTRIÈRES

Quel que soit le pays considéré, les avalanches "hors-saison" y font plus de dégâts que les avalanches "classiques". Le nombre moyen de personnes entraînés est supérieur, tout comme le nombre moyen de décès par accident.

Pour la France (ensemble des données disponibles depuis 1971)

- il y a eu au total 881 accidents = 2462 personnes entraînés (soit 3 par accident) = 668 morts (0,76/accident)

- si l'on distingue les avalanches en fonction de la saison,

dans les 746 avalanches survenues entre le 15.12 et le 1.5, il y a eu 2060 personnes entraînés (2,76 par accident) et 537 morts (0,72/accident)

dans les 135 avalanches survenues entre le 1.5 et le 15.12, 447 personnes ont été entraînés (3,31/accident) et il y a eu 131 morts (0,98/accident).

Pour la Suisse, il y a eu 621 accidents en 18 ans = 1804 personnes entraînés (2,9 par accident)= 495 morts (0,8/accident).

- en hiver, 540 accidents ont concerné 1477 personnes (2,7/accident) et fait 400 victimes (0,74/accident)

- "hors-saison", 81 accidents ont concerné 327 personnes (4,04/accident) et causé 95 décès (1,17/accident)

Pour l'Italie, le bilan est encore plus dramatique. En 6 ans, il y a eu au total 171 avalanches. Elles ont concerné 554 personnes emportées (moyenne 3,24/ avalanche) et causé la mort de 125 personnes (soit en moyenne 0,74 décès par avalanche)

- en hiver, 141 avalanches = 337 personnes entraînés (2,4 par accident)= 83 morts (soit 0,60 décès /accident)

- hors hiver, 30 avalanches = 117 personnes entraînées (3,9 par accident) = 42 morts (1,40 décès/accident)

Les chiffres obtenus sont très proches d'un pays à l'autre.

En France, une avalanche d'hiver concerne en moyenne 2,76 individus (entraînés) contre 3,31 hors-saison; il y a 0,7 décès par avalanche en hiver contre 0,98 hors-saison
En Suisse, il y a en moyenne 2,7 personnes emportées en hiver contre 4,04 hors saison; il y a 0,74 décès par avalanche en hiver contre 1,17 hors-saison
En Italie, le chiffre moyen d'individus emportés est de 2,4 en hiver contre 3,9 hors-saison; il y a 0,60 décès par avalanche en hiver contre 1,40 hors-saison

CONCLUSION PROVISOIRE ET PISTES DE RECHERCHE

Des avalanches peuvent se produire en toute saison. Elles ne sont pas seulement l'apanage de la saison de ski. Même si on peut chicaner sur l'exploitation qui est faite de ces statistiques, sur certaines interprétations ou certaines méthodes, on peut difficilement contester l'importance du phénomène (rappelons que l'ensemble de ces données porte sur près de 270 victimes).

A partir de ce premier constat, qui n'est qu'une étude préliminaire, un certain nombre de pistes de réflexion et de recherche se dessinent. On se bornera à en évoquer trois :

— **Peut-on améliorer la prévision** et l'information ? Des efforts sont faits dans ce sens, en particulier en France où les services officiels s'efforcent de fournir des informations sur la situation nivologique en avant et en arrière-saison (début décembre et mai). On se heurte cependant au problème de la rareté des données disponibles, du fait de la fermeture du réseau d'observation nivo-météo. Seules, les stations automatiques peuvent fournir des éléments. En cas de situation critique, on pourrait envisager la mise à contribution d'autres informateurs (gardiens de refuges notamment). Toutefois, le caractère brutal et parfois très localisé de certains phénomènes (orage accompagné de chutes de neige roulée par exemple) rend parfois peu pertinente une prévision à l'échelle d'un massif. L'application de modèles permet cependant d'espérer à terme une progression dans ce domaine.

— **Peut-on améliorer la perception** du danger ? Le nombre relativement élevé d'accidents, ainsi que leur caractère plus meurtrier, amène à poser la question de la perception du risque d'avalanche. Parmi les nombreuses idées fausses et dangereuses qui prospèrent dans la tête des montagnards, il faut lutter contre celle qui dit qu'il n'y a pas d'avalanches en été. Tout se passe comme si, avant Noël et après Pâques, le montagnard "baissait la garde", attachant moins d'importance aux évolutions de la neige, prenant moins de précaution dans le domaine de la prévention des avalanches au profit d'autres préoccupations de sécurité lui semblant plus de saison (encordement...). A ce propos, on peut poser une question provocatrice : pour des alpinistes, le fait d'être encordé n'est-il pas un facteur aggravant en cas d'avalanche ?

— **Peut-on améliorer la prévention** et les secours ? Une étude comparative sur les moyens de localisation des victimes en et hors hiver mettrait sans doute en évidence le très faible rôle salvateur joué par les Arvas dans ce dernier cas, surtout pour les alpinistes. Le port de ces appareils est encore loin d'être entré dans les moeurs des pratiquants de l'alpinisme d'été faisant des courses de neige. Cet élément permet peut-être de comprendre pourquoi les avalanches sont plus meurtrières, surtout en Italie où les alpinistes constituent, et de loin, la plus grosse catégorie à risques.

Le jour où le montagnard moyen aura admis que, quelle que soit la saison, il peut y avoir un risque d'avalanche en fonction de certaines conditions et que les précautions de rigueur en hiver (porter un Arva, avoir une pelle, observer des distances de sécurité, savoir faire demi-tour) n'ont rien de ridicule à la fin du printemps, en été ou à l'automne, un grand pas aura été franchi... mais il reste encore beaucoup à faire.

Bilan d'une enquête sur les déclencheurs à gaz (GAZEX)

F. Rapin, O. Carsana¹

RÉSUMÉ

Depuis fin 1988, le déclencheur à gaz est de plus en plus utilisé pour le déclenchement artificiel des avalanches. En mars 1994, la division Nivologie du CEMAGREF a jugé utile de procéder à une enquête sur plus de la moitié du nombre de tubes-exploseurs, ou dragons, alors installés dans le monde par la société T.A.S. (Technologie Alpine de Sécurité). Nous avons donc tenté principalement d'effectuer le bilan des installations, d'évaluer les caractéristiques des ouvrages en place (fiabilité, sécurité, vieillissement) et d'étudier leur comportement sur le terrain. Nous avons essayé d'émettre des suggestions dans une perspective d'amélioration technologique profitable aux utilisateurs comme au constructeur. Rapporté au nombre de dragons, le taux de réponse est très bon (80%), mais les résultats ne concernent donc que 45% du parc mondial de l'époque.

Au moyen de diagrammes, cette enquête évoque en particulier la nature des zones protégées, les dragons les plus utilisés, les critères de tir, l'estimation de sécurité atteinte, l'impact environnemental, les points forts et les points faibles (listes ordonnées) du produit tels que les utilisateurs le ressentent. Cette enquête, comme la très forte croissance du marché, montre que de nombreux clients sont satisfaits du produit. Malgré tout, quelques problèmes subsistent. Ils sont essentiellement dus à la pose. Les utilisateurs doivent en avoir connaissance soit au moment de faire leur choix, soit en cours d'installation, soit lors de l'entretien.

ABSTRACT A SURVEY OF GAZEX (gas exploders)

Since end of 1988, the gas releaser is increasingly used for artificial avalanche blasting. In March 1994, the division Nivologie at CEMAGREF deemed useful to carry out a survey on more than half all the Gazex explosion tubes (or dragons) in operation all over the world, installed by the company T.A.S. (Alpine Safety Techniques). Using the results, we have first attempted an evaluation of Gazex in term of reliability, safety, weathering, and user friendliness. We have then suggested some improvements aimed at increasing users, and also constructor, satisfaction. Related to the dragons' number, the rate of reply was very high (80%), but the results only concern 45% of the Gazex in operation in the world.

Diagrams especially present the extent of the protected zone, the frequency of use and, according to users' opinion, the shooting criteria, the level of safety, the environmental impact, most important strong and weak points. These results, as the brisk growth of the sales, confirm the satisfaction of many customers. They also account for some problems they must bear in mind when they plan their system, but also during its construction and its operation.

¹ CEMAGREF - Division Nivologie, BP 76, F-38402 ST MARTIN D'HERES, Tel : (33) 76.76.27.17, Fax : (33) 76.51.38.03

LA PRÉPARATION

Depuis fin 1988, le déclencheur à gaz est de plus en plus utilisé pour le déclenchement artificiel des avalanches : en décembre 1993 la société T.A.S. (Technologie Alpine de Sécurité) du Touvet en Isère, avait installé quelque 176 tubes-exploseurs, ou dragons, dans le monde. Il devenait donc pertinent de dresser une liste des points faibles et points forts de ces installations afin d'émettre des suggestions dans une perspective d'amélioration technologique. De plus, compte-tenu de la croissance des contraintes environnementales, nous tenions à connaître l'opinion des utilisateurs sur l'impact sonore et visuel des tubes-exploseurs sur les massifs alpins et transalpins. En mars 1994, la division Nivologie du CEMAGREF a donc jugé utile de procéder à une enquête technique des déclencheurs à gaz (Carsana, 1994).

Le questionnaire, très simple à remplir (cases à cocher), visait notamment à :

- répertorier les différents appareils ainsi que leur répartition géographique,
- étudier leur comportement sur le terrain (fiabilité, sécurité, vieillissement),
- évaluer les caractéristiques des ouvrages en place, en déterminer l'évolution,
- lister les différents problèmes apparus, résolus ou encore actuels,
- nouer des liens, des contacts entre la division Nivologie d'une part et les personnes concernées par l'utilisation des déclencheurs à gaz d'autre part.

Avant l'envoi, l'entrepreneur a validé la rédaction du questionnaire en langue française. Ainsi l'enquête a sollicité l'ensemble des 27 stations des alpes francophones (France, Valais Suisse, Val d'Aoste Italien) qui possédaient au moins un dragon. Rapporté au nombre de dragons, le taux de réponse s'établit à 79/99, soit 80%, ce qui est très bon. Toutefois, ceci ne représente qu'un peu moins de la moitié de l'effectif installé par le monde fin 93.

UNE EXPÉRIENCE TRÈS DIVERSIFIÉE

Les caractéristiques des ouvrages en place

La répartition globale des objectifs protégés par le GAZEX (voir figure n°1) n'est pas forcément respectée localement. La prédominance des domaines skiables est très marquée. La protection étant obtenue par déclenchement artificiel, les bâtiments sont, fort normalement, peu représentés. C'est le petit dragon, 1,5 m³, qui occupe près de la moitié du marché (voir figure n°2). Le coût des installations mais aussi la très bonne efficacité du produit expliquent en grande partie cet aspect.

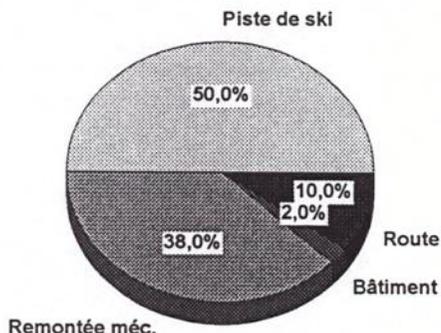


Figure n°1 : les objectifs protégés

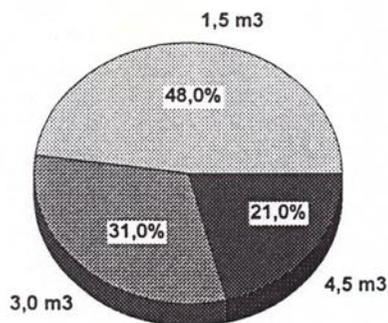


Figure n°2 : les dragons utilisés

Par rapport au nombre de centrale des gaz, la commande par liaison radio prédomine : elle concerne près de deux explodeurs sur trois (voir figure n°3). Tous les utilisateurs prennent en compte l'importance de la chute de neige comme critère de tir ; la moitié d'entre eux utilisent aussi la vitesse et la direction du vent ; la température est évoquée exceptionnellement : chaque artificier connaît donc l'amalgame de conditions nivo-météorologiques qui rend ses sites dangereux. Mais bien peu attendent la constitution d'un nouveau manteau neigeux important (voir figure n°4).

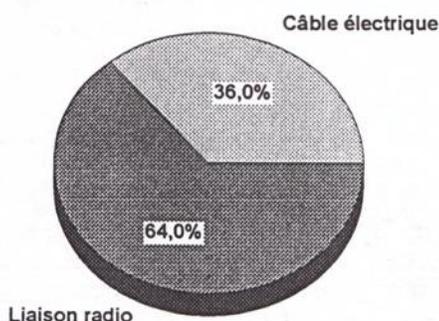


Figure n°3 : type de transmission de l'ordre de tir

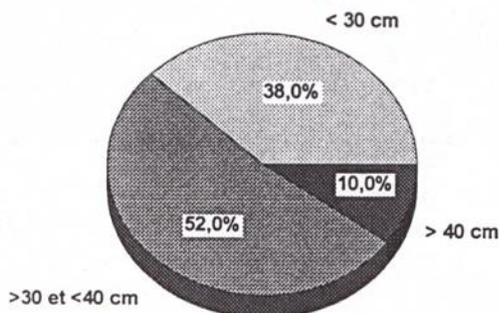


Figure n°4 : critère de tir : la chute de neige

Les avalanches sont déclenchées la plupart du temps avec de la neige sèche mais de cohésion variable (voir figure n°5) ; la somme des pourcentages de chaque "couple" peut être supérieur à 100 car chaque site peut parfois fournir plusieurs types d'avalanches, ou inférieur à 100 lorsque l'utilisateur ne sait pas ou a un doute). 76% des utilisateurs réalisent entre 20 et 30 tirs par saison et par dragon et 22% moins de 20. La localisation, la topographie, l'orientation du tube ainsi que la hauteur entre le tube et le manteau neigeux ont une grande influence sur la réelle efficacité de l'explosion (Gay, 1989).

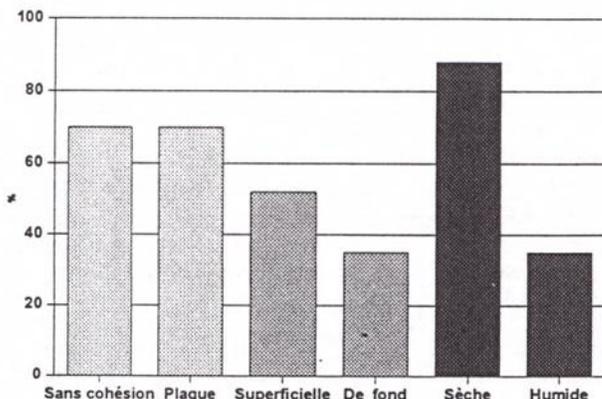


Figure n°5 : les types d'avalanches déclenchées

L'impact visuel des installations est jugé soit faible (55%), soit raisonnable (41%). L'impact sonore est, lui, souvent raisonnable (73%) et quelquefois important (18%) mais seule une réclamation à ce sujet a été relevée, ce qui est étonnamment faible.

Les problèmes apparus

Cette enquête a aussi permis de mettre à jour un certain nombre de problèmes qui ont parfois suivi l'évolution technologique du produit. Les problèmes de jeunesse et ceux qui se répètent au fil des saisons ont pu être distingués.

Dans la première catégorie, les problèmes de jeunesse résolus, le GAZEX a souffert au départ principalement de la foudre, de liaison radio et d'électronique, de la stabilité des ancrages, et des fuites de gaz.

Avec la foudre, le risque est élevé et demeurera permanent : situation des installations le plus souvent à proximité des crêtes, masse métallique notable du dragon en forme d'aiguille. Toutefois aucun tube-exploseur n'a été véritablement détérioré en lui-même par la foudre. Seuls des allumeurs piézo-électriques ont pu être altérés. La centrale des gaz est elle, sensible de par ses équipements (électronique, réserve de gaz propane, ...) : elle mérite donc une protection particulière (paratonnerre, cage maillée électrique, déconnexion estivale pratique des équipements sensibles). L'absence de liaison électrique entre le dragon et la centrale des gaz a constitué une amélioration fondamentale vite perçue par les utilisateurs. La mise au point d'allumeurs à dépression a permis une réduction notable de ce type d'incident. Mais il en a créé d'autres, beaucoup moins fréquents, comme le givrage du pressostat qui est dû à un défaut d'étanchéité à l'air des conduites.

L'électronique de la centrale des gaz est normalement conçue pour résister aux températures basses et à l'humidité montagnarde hivernale

La stabilité des ancrages a souvent été éprouvée par les contraintes considérables développées par l'explosion. Par exemple, sur la première génération de tubes-exploseurs et dans la partie aérienne de l'ancrage, des rondelles situées à la base des tiges s'étaient déformées. Il aurait fallu resserrer après la première saison d'utilisation. En fait il est difficile sur ce point de bien différencier les défauts liés à la conception de ceux dus au montage. La conception s'est efforcée d'intégrer ces difficultés et, depuis lors, de nouveaux dispositifs semblent donner satisfaction.

La lutte contre les fuites de gaz passe maintenant par le test, en atelier, avant livraison, de toute l'installation interne à l'abri. Toutefois la réserve d'oxygène, au niveau de son cadre lui-même ou de sa jonction avec la centrale des gaz, peut encore réserver exceptionnellement des surprises.

Dans la seconde catégorie, les problèmes encore actuels, le GAZEX souffre encore de quelques problèmes variés au niveau de la centrale des gaz comme l'aération (la neige entre alors à l'intérieur) ou d'autres comme le vieillissement prématuré de la batterie (voir figure n°6), au niveau des conduites d'amenée des gaz comme les chutes de pierres ou la reptation sur les conduites (voir figure n°7). Il faut toutefois bien observer que près de la moitié des utilisateurs ne connaissent pas de problèmes sur chacun de ces deux éléments.

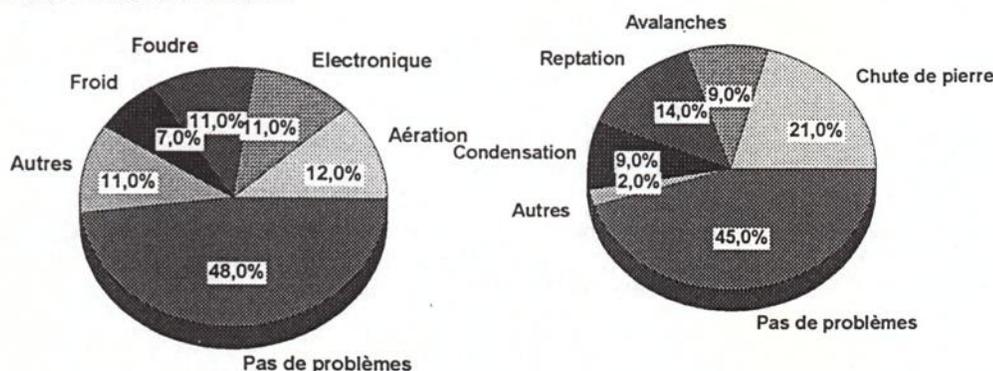


Figure n°6 : les problèmes de la centrale des gaz

Figure n°7 : les problèmes des conduites de gaz

En cas de suspicion de givre, le panneau solaire doit être surveillé dès que possible pour prévenir une éventuelle défaillance des ressources électriques. Si les cellules solaires sont recouvertes, il faut prévoir l'élimination du givre mais aussi le changement de batterie.

Concernant les conduites d'amenée des gaz, il faut absolument éviter les problèmes tels que leur

perçement par les chutes de pierre et leur arrachement par la reptation de la neige. La crédibilité du GAZEX en est encore fortement altérée. Les conduites souples (polyéthylène) doivent être enterrées ou protégées, même si la nature des "sols" ne s'y prête pas bien ou si les chantiers sont tardifs. Les réparations hivernales consécutifs à ces problèmes se révèlent très souvent particulièrement dangereuses voire impossibles. Les conduites doivent être renforcées. Le poseur doit les fixer partout convenablement et le client ne doit pas le contraindre à travailler trop tard dans la saison d'automne.

Les ratés de tir sont plutôt marginaux en nombre : 18% des utilisateurs n'en ont même jamais connu et les autres les signalent plutôt comme résolus, à 76%, sauf pour les autres problèmes comme la batterie (voir figure n°8).

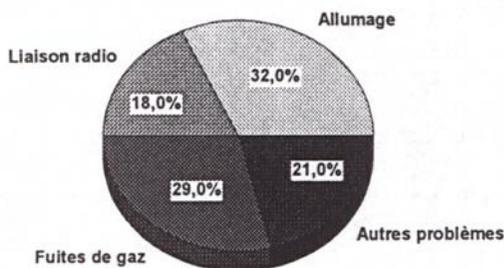


Figure n°8 : origine des ratés de tir

Tableau n° 1 : Récapitulation des problèmes rencontrés lors de l'utilisation

	Fréquence :	Origine :	Problème :
	○ ○ très rare ○ rare ● fréquent ● ● très fréquent	□ concept ■ pose	R : Résolu A : Actuel
Déclenchement intempestif	○ ○	□	R
Liaison radio	○	□	R
Informatique	○	□	R
Froid (électronique)	○	□	R
Givrage des panneaux solaires	○	□	A
Foudre	●	□	R
Fuite du cadre oxygène	●	□	R
Serrage des écrous des pieds supports	●	■ □	R
Gel d'un clapet anti-retour	●	■	R
Givrage du pressostat	●	□ ■	A
Déficiance des capteurs pression oxygène	●	□	A
Condensation point-bas des conduites	●	■	A
Sectionnement des conduites	● ●	■	A

On voit que les problèmes rares apparaissent plutôt comme des problèmes résolus. Et inversement. Il s'agit peut être d'une perception de l'utilisateur à un instant donné. De plus la distinction entre les problèmes de conception de ceux dus à la pose montre que ce sont ces derniers qui sont globalement les plus fréquents. L'avantage d'un véritable suivi de chantier est donc très réel. Enfin le client doit entretenir son installation sous peine d'accumuler les difficultés. Ce n'est pas un gros travail mais il doit être renouvelé régulièrement avec attention. Un stage d'entretien suivi par l'agent concerné bénéficiera certainement au client.

Un bilan globalement favorable

Voici, classés par ordre décroissant de satisfaction des utilisateurs, les principaux critères évoqués:

Tableau n ° 2 : Les points forts et points faibles des GAZEX

Rapidité d'intervention	☺☺	Condensation dans les conduites	☹
Sécurité des utilisateurs	☺☺	Tenue de la batterie	☹
Non utilisation d'explosif	☺☺	Aération de la centrale des gaz	☹
Tir à distance	☺☺	Tenue des ancrages aval	☹
Indépendance vis à vis de la météorologie	☺☺	Indicateur de pression oxygène	☹
Aspect pratique	☺	Conduites endommagées (par les chutes de pierre, la reptation ...)	☹☹
Efficacité des tirs	☺	Coût d'investissement	☹☹
Coût de fonctionnement	☺		

Légende :

Très satisfait	Satisfait	Insatisfait	Très insatisfait
☺☺	☺	☹	☹☹

Quatre utilisateurs sur cinq considèrent le GAZEX comme un outil rapide et sécurisant pour eux. Rapide car il ne faut que quelques minutes pour mettre en oeuvre un tir, surtout en le comparant aux autres systèmes de déclenchement artificiels (Rapin et Gay, 1991). Sécurisant car il n'y a plus d'utilisation de l'explosif, plus d'intervention risquée à proximité d'une zone de départ (tir à distance). Trois utilisateurs sur cinq reconnaissent son aspect pratique (plus de nécessité d'une équipe nombreuse sur site) et son efficacité dans les tirs, améliorée vis à vis des autres systèmes.

Le coût total des GAZEX s'articule autour du coût d'investissement (fourniture et pose) et du coût de fonctionnement. Les tarifs de fourniture sont a priori uniformes pour toute la France avec cependant des variantes pour les bons clients, en fonction de l'ancienneté, de l'importance des commandes, de la rapidité de paiement. Le coût du génie civil et du montage est plus variable : il peut en effet varier du simple au double en fonction des difficultés d'accès et de travail dans la zone de départ (pente et nature du sol). Néanmoins une grande majorité des utilisateurs, 73%, trouve ce coût

d'investissement important. En revanche ils jugent raisonnable, à 57%, ou faible, à 33%, le coût de fonctionnement qui est limité en grande partie aux rotations d'hélicoptère nécessaires chaque année pour le renouvellement des réserves de gaz.

CONCLUSION

La majorité des utilisateurs reconnaît l'apport considérable représenté par le GAZEX dans la lutte contre les avalanches. Le milieu du déclenchement préventif est conscient de l'intérêt spécifique de ce produit et s'accorde à dire que ce sera certainement, tant au niveau du concept que de l'efficacité, l'outil des années à venir.

Cependant, derrière cet accord quasi général qui explique la progression très soutenue du marché du GAZEX, le contraste est flagrant entre deux catégories d'utilisateurs :

- ceux dont les installations fonctionnent normalement, sans problème majeur ; ils représentent une petite moitié des personnes sondées ; ils sont assez enthousiastes ;
- ceux qui sont aujourd'hui encore régulièrement confrontés à des problèmes que l'on pourrait qualifier de détails ou de finitions ; ils sont plutôt déçus de ne pouvoir passer un hiver sans subir au moins une panne et sans avoir à intervenir sur leur installation en cours de saison.

Il faut donc encore progresser pour répondre aux souhaits des utilisateurs, c'est à dire :

- * tester complètement les innovations, en atelier ou sur site d'essai ;
- * améliorer la fiabilité de l'appareil (lutte contre le givrage du pressostat, évacuation des ennuis liés à la reptation de la neige, vérification de l'étanchéité dans les conduites de gaz,);
- * améliorer les connexions (lutte contre les fuites au niveau des raccords du cadre et des bouteilles);
- * fiabiliser dans le temps le système d'ancrage ;
- * pouvoir disposer d'un système simple et peu onéreux de retour d'information sur la réussite de l'explosion.

Mais le client doit s'assurer au départ de la bonne pose de ses installations (conduites, ancrages) et, après réception, de leur entretien (retrait estival des parties sensibles à la foudre, vieillissement des batteries).

Avec cette enquête, les utilisateurs ont pu exprimer à la fois leur satisfaction sur de nombreux points mais aussi leur relative déception sur plusieurs autres. En éclairant en même temps le constructeur et les clients ce bilan participe à l'amélioration du produit.

BIBLIOGRAPHIE

Carsana O., Juin 1994, *L'exploseur à gaz (GAZEX) - Bilan, recensement, normalisation*, ENGEES - CEMAGREF Nivologie, 108 pages

Gay M., Juin 1989, *Mesures de surpression créée par une explosion à partir d'un GAZEX*, CEMAGREF Nivologie, 50 pages

Rapin F. et Gay M., Juin 1991, A propos du déclenchement artificiel : comment choisir entre CATEX et GAZEX ?, *Actes du symposium ANENA de Chamonix*, 5 pages

An integrated system for artificial avalanche control

Un système intégré pour le contrôle des avalanches artificielles

H. Gubler¹

RESUME

Une station automatique pour des mesures de neige est équipée par un radar de profil de neige, un géophone et un système de contrôle pour deux tubes GAZ-EX. Pour diminuer le risque résiduel d'accidents d'avalanche avec la méthode du déclenchement artificiel, l'évaluation de la stabilité dans la zone de décrochement, la détermination de l'instant du décrochement, la fiabilité de la technique du déclenchement artificiel et le jugement du résultat du test de stabilité doivent être perfectionnés.

Le radar de profil de neige mesure l'accumulation de neige, le tassement, la fonte et la percolation de l'eau et la hauteur de fracture. Le géophone, proche de la zone de décrochement, fournit de l'information additionnelle sur l'activité avalancheuse et la grandeur des avalanches. Le système de contrôle intégré informe l'utilisateur de l'état du GAZ-EX (pression du gaz, température, nombre de tirs, problèmes), permet de déclencher les deux GAZ-EX et de mesurer les chutes de pressions pendant le chargement des tubes. Les stations sont connectées par radio et téléphone avec les stations de bases. Le panneau de contrôle et la visualisation des données fonctionnent sous MS-Windows.

Les systèmes peuvent être interrogés par tout PC équipé des programmes et des codes d'accès et de sécurités nécessaires.

ABSTRACT

An automatic station for snow measurements has been supplemented with a snow profile radar in the release zone, a geophone and a control system for two GAZ-EX exploders. To reduce the residual risk for avalanche accidents by applying the method of artificial release, stability evaluation within the release zone, timing of the avalanche control activity, reliability of the release technique and assessment of the result of the stability test have to be improved. The system described fulfils these requirements.

The snow profiler measures snow accumulation, snow settling, melting and water percolation as well as release height. The geophone located close to the release zone gives additional information on avalanche activity and avalanche size. The integrated control system for the GAZ-EX informs continuously on the status of the GAZ-EX (gas pressures, temperatures, number of shots, problems), allows to fire the two GAZ-EX tubes and measures the pressure drops during the process of firing. The remote stations are connected by radio and phone to the base stations. The GAZ-EX control panel and the data visualization run under MS-Windows. The systems can be inferred from any PC having the necessary software installed including access- and security codes.

INTRODUCTION

Different permanent and temporary measures have proven their reliability to reduce the risk of avalanche accidents. Permanent measures as supporting structures in potential release zones, earth piles, deflecting and collection dams in runout zones, avalanche splitters, road galleries are examples for permeant structures to reduce the probability of damages caused by avalanches within given areas. These methods are mainly used in cases where the area to be protected has to be safe continuously and high, non-removable property values are present. These measures require large investments and often permanently spoil the landscape.

Temporary measures include avalanche warnings, closure and evacuation of endangered zones, and the method of artificial avalanche release and stability tests. To get a low risks for accidents and damage permanently, it is unconditionally necessary to be able to close and evacuate the potentially endangered zone, including the extreme runout, at any time. Buildings and structures within this

¹AlpuG, Richtstattweg 2, CH 7270 Davos Platz, Tel. Fax ++41 (0)81 46 10 19

zone have to be reinforced to withstand avalanche impact pressure. Artificial avalanche release as one of the most important temporary measures for avalanche safety control has gained importance during the last years. The reasons are: improved knowledge of the mechanism of avalanche formation, new and improved methods for artificial avalanche release but also limited money for permanent avalanche defense structures. This technique is worldwide regarded as a standard method for protecting ski runs and traffic lines (e.g. mountain roads) from avalanches.

MEASURES TO REDUCE RISK OF AN ACCIDENT FOR A GIVEN AVALANCHE WITH TEMPORARY MEASURES

Ski runs, lift tracks, cross country ski tracks, tourist trails, mountain roads and railway tracks are quite often endangered by avalanches that occur naturally at low mean return periods (up to several times per year). In many cases these endangered areas can be closed and evacuated quite easily and the structures remaining within the endangered areas can be designed to withstand avalanche impact. Under these conditions temporary measures including the method of artificial release are well suited to reduce the final risk of an avalanche accident.

The goal of the method of artificial release of avalanches is to remove unstable snow from potential release zones, to limit avalanche size, and therefore to reduce the probability for unforeseen avalanche occurrences within the area to be protected for known limited periods of time. The method also allows to test snow stability in potential release zones.

ASSESSMENT OF AVALANCHE DANGER OR SNOW STABILITY

For local avalanche warning systems, it is necessary to supplement meteorological and manual observations by snow parameters measured automatically in the release zones and at representative locations. The systems have to supply reliable data on the development of dangerous snow cover stratigraphies between and during storms. The parameters measured should be closely related to the processes determining stability of the snow cover in potential release zones (Gubler, 1992). These processes are: formation of weak layers as a necessary condition of slab formation, loading, variation of slab strength and viscosity, and as the most direct stability indicators: initial fracturing and avalanching. With the microwave snow stratigraphy radar placed directly within the release zone (Gubler, 1988, 1991) snow accumulation (loading), settling (increase of strength and viscosity), stratigraphy (crusts, weak layers, water percolation, melting) but also fracture heights and flow heights of avalanches (partial unloading, future avalanche size) can be directly observed. Because the radars are buried in the ground looking upwards through the snow cover, they are not endangered by creep, glide and avalanches. Ultrasonic snow depth gauges, although they have been significantly improved during the last years, measure only total snow depth and cannot be located directly in release zones. Usually they will be installed at representative but safe sites, together with additional instrumentation: snow temperature and IR-surface-temperature measurements, combined with the measurement of reflected short wave radiation, air humidity and temperature measurements that allow for direct modelling of weak layer formation. For the assessment of snow drift, wind recording can be combined with index measurements of snow drift flux (optical instruments available, acoustical instruments under development at LEMA, EPFL). Geophones buried in the ground indicate avalanche flows and detonations for artificial release (e.g.

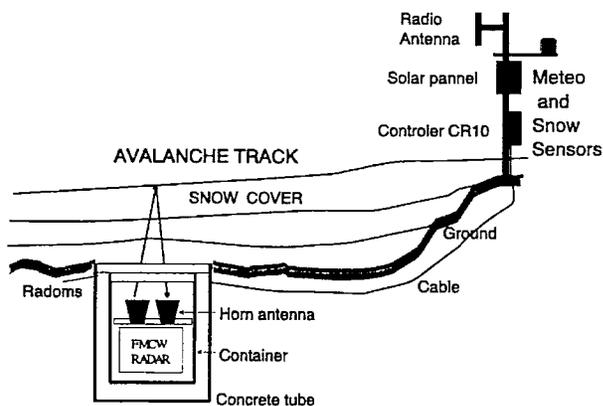


Fig. 1 Typical setup of a warning station

Gaz-Ex). A typical installation is shown in Fig. 1.

The information is used to assess the actual danger. It may be helpful to store these data together with avalanche observations in a data base to allow comparisons between similar actual and past situations. Expert systems can be adapted to support the assessment. At SFISAR, R. Bolognesi (1994) has developed a tool to support the method of artificial release of avalanches in given release zones. NXLOG combines nearest neighbour methods with rule based symbolic calculation (artificial intelligence techniques, A.I.) to arrive at a probability for an artificially released avalanche in a given gully.

Artificial release and stability test

Slabs are released or stability is tested by applying additional stresses to the snow cover. The stresses are generated by the detonation of explosives, gas mixtures etc.

Today only the GAZ-EX system can be remote controlled any time. Firing of projectiles and CATEX allow also for limited remote control of avalanches, the use of pre-placed dynamite connected to a remote firing control is forbidden in most countries.

The size and topography of the potential release zone determines the number of necessary shot points.

The different methods differ significantly in their sensitivity to weather conditions (visibility, wind, riming), execution times, achievable safety and costs.

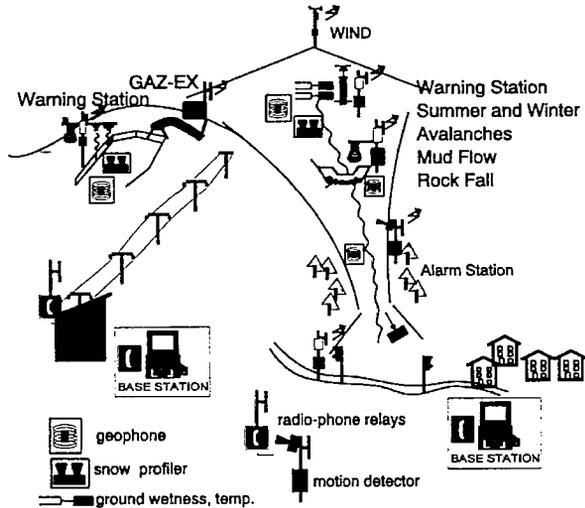


Fig. 2 Integrated warning and alarm network

THE INTEGRATED AVALANCHE SAFETY SYSTEM

For the experts in charge of avalanche safety, it would be very helpful to have integrated systems at hand that allows them to follow up the development of snow cover stability in given release zones, to remotely initiate explosions and to check if an avalanche has been released. The basic setup of the system is shown in Fig.2. So far only GAZ-EX exploders allow remote control. If the system is connected to the public phone-system by a radio-phone relays, remote access to the measuring and control systems is possible from any phone line connector with a PC or notebook computer equipped with a phone modem.

The integrated system has several advantages:

- During storms the development of the snow cover in the release zone can be examined 24 hours a day.
- Registration of natural releases.
- If the area is closed and evacuated, remote control of firing is possible 24 hours a day independent of the weather.
- Within a few minutes after the firing, fracture height of a released avalanche can be estimated.
- Assessment of weak layer formation between storms.
- In spring the necessary conditions for releases of wet surface slabs can be assessed.

All these feature help to reduce closure times and to increase avalanche safety, and to reduce the chance for the formation of large avalanches.

PROTOTYPE SYSTEM AT AMINONA

One of the first commercial GAZ-EX system worldwide has been installed at the ski area of TEL AMINONA. The systems were installed to protect ski runs and touristic installations.

The GAZ-EX installation consists of two exploder tubes. An additional CATEX is installed in the same area. One of these CATEX towers located some 70m below GAZ-EX tube 1, just at the border of the avalanche release zone has been used as the supporting structure for the data transmission station and the wind, radiation and temperature measurements. The following parameters are measured : wind speed and direction, air temperature and air humidity at the 5m level, air temperature at the 2m level, snow surface temperature with an infrared thermometer, shortwave radiation reflected by the snow cover, ground temperature and snow temperature near the ground, seismic events triggered by explosions and a microwave snow profile about 30 m below GAZ-EX 1, within the release zone.

The systems performs different on site calculations to increase the density of information transmitted to the base stations. This calculations include the Fast Fourier Transform of the radar

data and the seismic data as well as the determination of additional seismic parameters, the calculation of an index that characterizes the actual snow surface, and status parameters for all sensors. For the moment the surface index indicates only surface rime but it is planned, and most of the development has already been done, to include surface melting, crust formation, and eventually grain type and size.

At the GAZ-EX supply station a remote control and monitoring system has been installed that uses identical data acquisition, control and transmission technique as for the snow data station. This system monitors oxygen pressure in the storage bottles, as well as oxygen and propane pressure in the mixing tanks, and air temperature. The system controls the two valves for the two GAZ-EX exploders, checks the pressures in the mixing tanks, avoids ignition if pressures are outside their limits, checks incoming firing commands and transmits pressure and status information at regular intervals to the base station. During firing, the pressure drops in the mixing tanks are measured at .5s intervals. The system has still lots of free capacity to perform additional meteo-, snow or GAZ-EX- system parameter measurements or to perform additional control tasks.

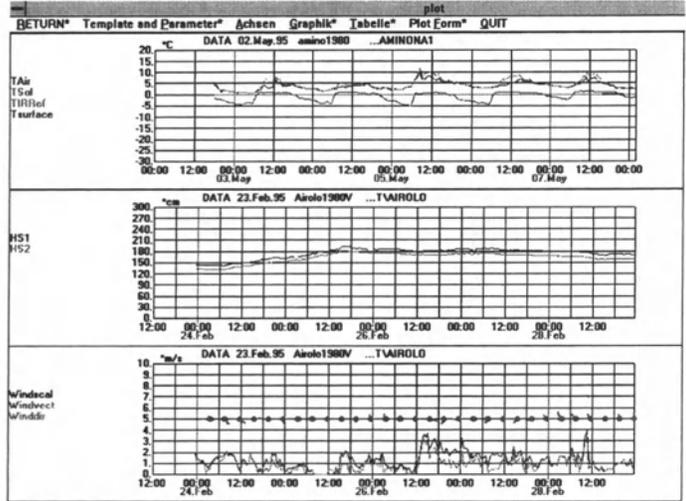


Fig. 3 Data presentation with LOGCALL

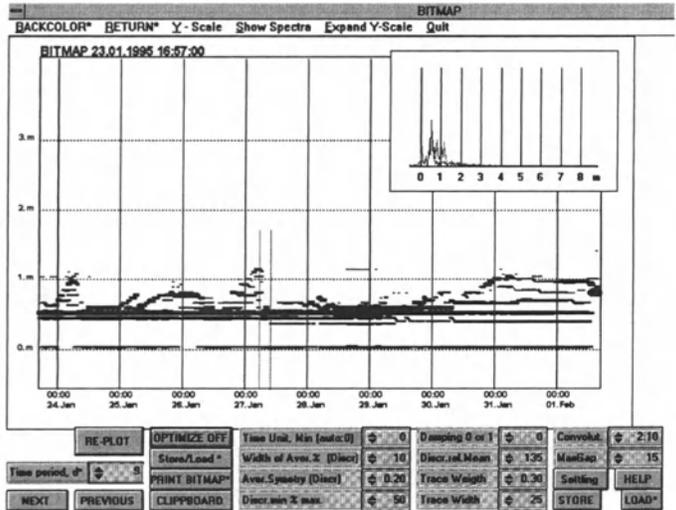


Fig. 4 Snow profile bitmap

A radio-telephone relay is installed at the gondola uphill station. The PC at the safety control room is connected by an internal phone line to the relays. But the relay is also accessible through the public phone system under the condition that the necessary codes are known.

The software installed at the base station PC is MS-WINDOWS based, and consists of four main windows: data visualisation, GAZ-EX control, profile-radar control and a scheduler. The data visualisation program (LOGCALL) basically allows data acquisition, storage and presentation from most automatic snow stations in Switzerland, as well as the visualisation of the snow profiler data and the GAZ-EX control data.

LOGCALL (Examples Fig. 3 and 4) gets data from the different stations at regular time intervals, but it allows also immediate station calls if the PC (Notebook) is not connected 24 hours a day to a phone line. Instead of connecting the notebook to a phone line, it can also be connected directly to a radio, allowing the user to connect to his stations and to control the GAZ-EX from anywhere within the range of the radio.

Data can be presented and printed in many ways. The user can produce his own macros using a special recorder mode. All functions and data presentations can be initiated also from the RADAR-, the GAZ-EX-, the scheduler- or a special command window.

The RADAR window (Fig. 5) allows a complete control of the profile radar (secured by access codes) including control of the measuring interval, electronic filter control and test measurements transmitting analogue signals and spectra. Visualisation of the microwave snow profiles can be initiated from the RADAR window or any other command window. The GAZ-EX window (Fig.6)(secured by different levels of access and command codes) permits checking the status of the exploders, to select an exploder and to fire. The pressure drops are automatically recorded and can be visualised about 2 minutes after the shot was initiated. Because the detonations will always trigger a seismic recording, the occurrence of this trigger can be used as an additional check for a successful GAZ-EX initiation. Looking more closely at the time evolution of the seismic signal after firing is an

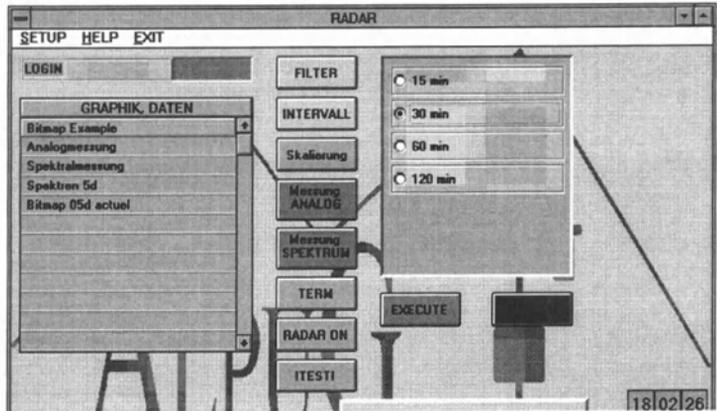


Fig 5 Radar control window

additional possibility to estimate the size of the avalanche. If more information is needed an immediate radar measurement has to be initiated after the shot to estimate fracture height.

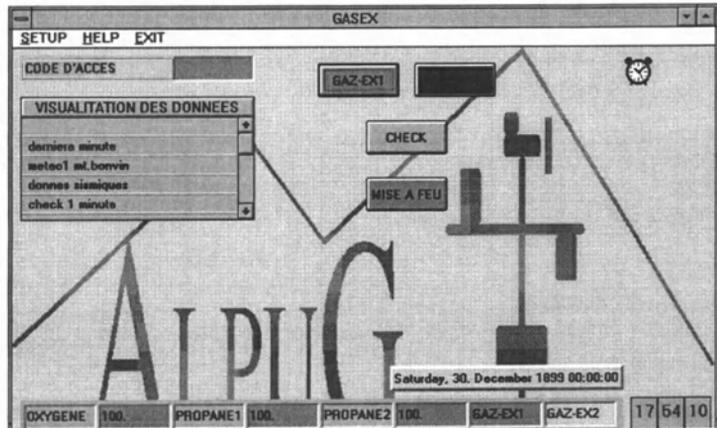


Fig. 6 GAZ-EX control window

CONCLUSIONS

We think that the system has proved its reliability in practice and still has a great potential for further improvements. The snow profiler adds an additional dimension to the remote sensing of the snow cover, because it allows to monitor important parameters within the release zone. The combination of stability evaluation based on local measurements with the remote control of exploders to release avalanches or to test stability, and the possibility to assess the result of the test almost immediately, hopefully helps practitioners to efficiently do their job to decrease the risk of avalanche accidents and damage, but also to reduce closure times especially for traffic lines.

ACKNOWLEDGEMENTS

A first system has been installed for TEL AMINONA at Mt. Bonvin in the Valais. The development of the systems is supported by the canton du Valais, l'office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage and TEL AMINONA. My special thanks go to Fabrice Meyer, the safety manager of TEL AMINANO, who has used and tested the system last winter.

REFERENCES

Bolognesi (R.), 1994 - Local avalanche forecasting in Switzerland: Strategy and tools. To be published in *Proceedings of ISSW 1994, ALTA, USA*.

Gubler (H.), Hiller (M.), Weilenmann (P.), 1988 - Remote on-line snow cover profiling in avalanche release zones using microwave radar, *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Whistler, Canada, pp. 166-174*.

Gubler (H.), Hiller (M.), Weilenmann (P.), 1991 - New Instruments and their possible use in avalanche warning, *Proceedings of Symposium de Chamonix 1991*, pp.83-91, ANENA, 15 rue Ernest Calvat 38000 Grenoble France.

Gubler (H.), 1992 - Slab avalanche formation, new measurements and results, *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado U.S.A.*, pp. 134-149.

Modélisation de la réflectance de la neige du visible au proche infrarouge Comparaison avec des mesures en laboratoire Application à la télédétection

C. Leroux¹, J. Lenoble¹, C. Sergent², M. Fily³, J.W. Hoviener⁴

RESUME

Un modèle de réflectance de la neige dans le spectre solaire basé sur la méthode adding/doubling a été développé. L'effet de la pollution dans le visible et de la taille des grains dans le proche infrarouge est étudié. Les résultats de la modélisation sont comparés à des mesures expérimentales de laboratoire. A la suite d'une campagne de mesures (sol, satellite) au dessus des Alpes, on souhaite comparer les données satellitaires (couplées à la modélisation) aux mesures terrain ainsi qu'aux simulations du modèle CROCUS.

ABSTRACT

Modelling of the snow reflectance based on the adding/doubling method had been developed. The soot contamination effect in visible wavelenghts and the grain size effect in near infrared are described. The model calculations are compared to laboratory measurements. Following a measurement campaign (ground, satellite remote sensing) over the Alps, satellite data together with modelling will be compared to ground measurements and CROCUS simulations.

INTRODUCTION

La cryosphère joue un rôle important par sa réflectance élevée dans le bilan radiatif du système terre-atmosphère. L'albédo de la neige est donc un paramètre climatique capital tant au niveau global qu'au niveau local puisqu'il intervient aussi dans les modèles de métamorphisme de la neige servant à la prévision des risques d'avalanches (modèle CROCUS développé au Centre d'Etudes de la Neige, Brun et al., 1992). La modélisation, et par conséquent l'étude des relations entre les paramètres optiques et la réflectance de la neige est indispensable. La prise en compte dans les modèles de la topographie, de la rugosité des surfaces visées ainsi que de la diffusion atmosphérique qui perturbe le signal satellitaire permettra, nous l'espérons l'analyse des données de télédétection.

1- MODELISATION DE LA REFLECTANCE DE LA NEIGE

1.1. Diffusion simple

Les paramètres optiques de diffusion simple (albédo simple de diffusion (ω_0), sections efficaces

¹Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Université des sciences et techniques de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq, France.

²Centre d'Etudes de la neige, Météo France, 1441 Rue de la piscine, 38406 Saint Martin d'Hères, France.

³Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'environnement, CNRS, Université Joseph Fourier, 38402 Saint Martin d'hères, France.

⁴Department of physic and astronomy, Vrije Universiteit, University of Amsterdam, De Boiaan 1081, NL-1081 HV Amsterdam, Netherlands.

de diffusion et d'extinction ($\sigma_{sca}, \sigma_{ext}$), facteur d'anisotropie (g), fonction de phase (F_{11})... sont calculés à partir de la théorie de Mie. Les particules de neige sont assimilées à des sphères suffisamment éloignées les unes des autres pour pouvoir négliger les effets de champ proche.

1.2. Modèle adding/doubling

C'est un modèle numérique bidirectionnel initialement conçu pour calculer la réflectance (R) et la transmittance (T) de l'atmosphère. Il a été développé par le département de physique et d'astronomie d'Amsterdam (De Haan et al., 1987).

En superposant deux couches homogènes l'une au dessus de l'autre, chacune de réflectance et de transmittance connue, en tenant compte des réflectances successives entre les deux couches on déduit la réflectance et la transmission de la couche équivalente au système. Lorsque les deux couches sont identiques (même réflectance même épaisseur optique) on parle de doubling.

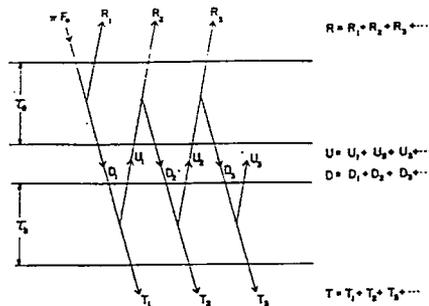


Figure 1. Représentation schématique de la méthode adding appliquée sur deux couches d'épaisseur optique τ_a et τ_b .

Le milieu plan parallèle considéré est divisé verticalement en couches homogènes elles mêmes subdivisées en sous couches. La sous couche de départ doit être suffisamment fine optiquement pour être caractérisée par ses propriétés de diffusion simple.

Le modèle peut tenir compte de la polarisation en utilisant des matrices R et T .

1.3. Application au milieu neige

1.3.1. Approximation delta

L'application du modèle tel quel au cas de la neige était impossible car elle aurait nécessité des temps et des moyens de calculs colossaux.

Dans le cas de particules de grande dimension par rapport à la longueur d'onde, une très grande partie de la diffusion se fait vers l'avant. L'idée de l'approximation delta est de remplacer ce pic avant par une fonction delta. Ce qui revient physiquement à supposer que le rayonnement diffusé dans le cône avant est transmis. On a remplacé le milieu réel par un milieu équivalent dont il convient de calculer les paramètres de Mie. Soit F_{11} la fonction de phase du milieu réel, $F_{11}^{(2-A)}$ la fonction de phase tronquée du pic avant, Θ l'angle de diffusion et A l'aire tronquée à la fonction de phase, (figure 2). La relation qui exprime la troncature est:

$$F_{11}(\Theta) = A\delta(1 - \cos\Theta) + (1 - A/2)F_{11}^{(2-A)}(\Theta)$$

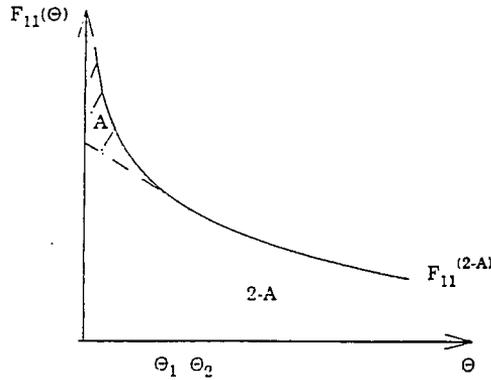


Figure 2. Représentation de la fonction de phase tronquée.

1.3.2. Prise en compte de la pollution

Dans le spectre visible, la pollution de la neige par le carbone suie a pour conséquence une diminution de la réflectance. Pour modéliser la présence de ces impuretés que nous supposons sphériques nous avons considéré deux types de mélange:

- Le mélange interne modélise les impuretés à l'intérieur des particules de neige. Ce qui revient à calculer un indice de réfraction glace-carbone, (Choudhury et al., 1981) et à calculer les paramètres de Mie pour ce nouvel indice. Soient m_{ice} l'indice de la glace, m_{soot} l'indice du carbone et f la concentration volumique du carbone, on définit l'indice du mélange par:

$$m_m = (1-f)m_{ice} + fm_{soot}$$

-Le mélange externe modélise les impuretés à l'extérieur des grains de neige, on considère séparément les deux types de particules (Hapke, 1993, p279). On calcule les paramètres de Mie du mélange en fonction des paramètres de chacun des constituants d'où:

$$\sigma_{sca,ext} = \frac{\sum_{i=ice,soot} N_i \sigma_{sca,ext,i}}{\sum_{i=ice,soot} N_i}$$

$$F_{11} = \frac{\sum_{i=ice,soot} N_i \sigma_{sca,i} F_{11,i}}{\sum_{i=ice,soot} N_i \sigma_{sca,i}}$$

où N_i est la concentration en nombre de particules.

2- COMPARAISONS MODELE-MESURES EN LABORATOIRE

2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental du C.E.N. mesure la réflectance directionnelle hémisphérique d'échantillons de neige soumis à un flux diffus généré par une sphère intégrante, la visée se fait perpendiculairement à la surface de l'échantillon. Les mesures sont effectuées sur les spectres 0.4 à 1 μm et 0.8 à 1.6 μm (Sergent et al., 1992).

A l'issue de la mesure un système de prise d'images associé à un logiciel de digitalisation fournit un histogramme et la valeur moyenne des rayons de grains prélevés sur l'échantillon étudié.

2.2. Résultats et discussion

2.2.1. Effet de la pollution

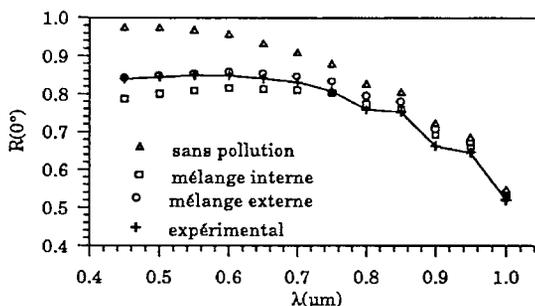


Figure 3. Modélisation de la réflectance directionnelle sur le spectre visible à l'aide des deux types de mélange et comparaison avec les mesures. Le rayon moyen des grains de neige (mesuré par digitalisation) est $261 \mu\text{m}$ celui des impuretés $0.1 \mu\text{m}$ (Warren, 1980). La concentration en carbone suie est 0.36 ppmw . L'indice de réfraction du carbone suie est tirée de la revue World Climate Program.

Le mélange interne surestime l'effet de la pollution. Le mélange externe semble plus adapté, figure 3. Cependant il est fort probable que les impuretés ne soient pas mêlées à la neige selon l'un ou l'autre des deux mélanges mais plutôt selon une combinaison des deux. La difficulté essentielle de la modélisation provient de la méconnaissance de la forme, la taille, l'indice de réfraction du carbone suie.

2.2.2. Effet de la taille des grains

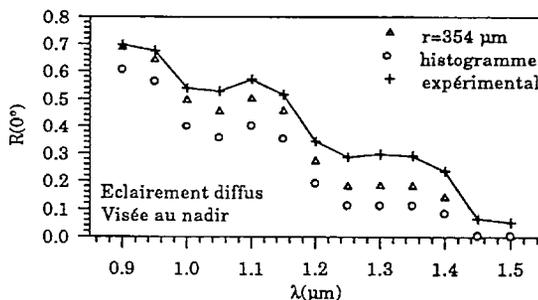


Figure 4. Réflectance directionnelle pour différentes tailles de grains de neige sur le spectre proche infrarouge et comparaison avec les mesures. Le rayon utilisé et l'histogramme des rayons proviennent de la digitalisation des grains de l'échantillon.

Dans le proche infrarouge, l'effet de la pollution est négligeable par rapport à l'absorption propre de la glace mais l'influence de la taille des grains de neige devient dominante: il est donc nécessaire de bien définir ce paramètre. C'est un point essentiel et très difficile à résoudre sachant que la modélisation des grains par des sphères est une approximation et que l'on fait correspondre à un grain un paramètre de taille plus ou moins subjectif. L'utilisation brute de l'histogramme ou du rayon moyen ne permet pas de retrouver les valeurs expérimentales, (figure 4). L'effet de la forme des grains non prise en compte dans le modèle peut varier suivant la longueur d'onde.

Il est à noter que dans la gamme de longueur d'ondes étudiées la réflectance est fortement influencée par les valeurs de l'indice imaginaire de la glace, et que nous ne disposons que des mesures d'indices tabulées par Warren (Warren, 1984).

3- COMPARAISONS MODELISATION-MESURES SATELLITAIRES

3.1. Mesures satellitaires

L'étude porte sur une image Landsat Thematic Mapper du 24 Avril 1992 qui recouvre plusieurs sites des Alpes, nous nous sommes intéressés au massif de l'Oisans et avons retenus trois canaux du capteur (Hernandez, Fily, 1995). Le canal visible TM3 (0.66 μm) est sensible à la pollution de la neige et subit l'influence de la diffusion atmosphérique. Les canaux TM4 (0.85 μm) et TM5 (1.65 μm) dans le proche infrarouge dépendent de la taille des grains de neige.

3.2. Résultats et analyse

La réflectance modélisée est calculée au sol. Elle est bidirectionnelle puisqu'elle est dépend des géométries solaires et de visée. Soient θ les angles zénithaux, ϕ les angles azimutaux, L la luminance ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) et E l'éclairement solaire ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$) elle s'écrit:

$$\rho(\theta_i, \phi_i, \theta_v, \phi_v) = \frac{L(\theta_v, \phi_v)}{E(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i} \quad (\text{en sr}^{-1})$$

Le capteur, lui, mesure des luminances au sommet de l'atmosphère.

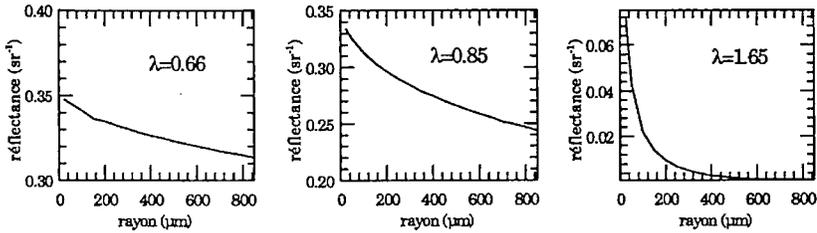


Figure 5. Modélisation de la réflectance en fonction du rayon des grains.

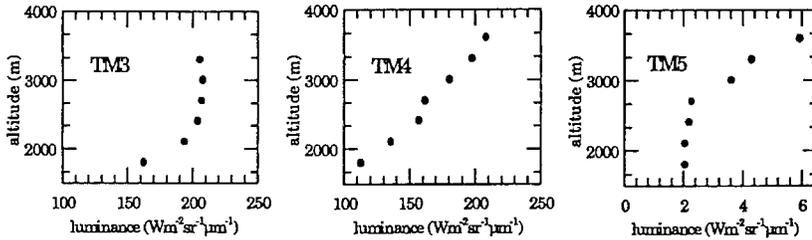


Figure 6. Dépendance des luminances TM avec l'altitude du sol, pour un sol plat (pentes de 0 à 10°).

Les grains étant d'autant plus gros qu'ils se situent bas en altitude, nous retrouvons bien les mêmes allures pour les deux figures 5 et 6. Le canal TM3 a une réflectance (ou une luminance) indépendante de la taille des grains. Le canal TM4 a une dépendance quasi linéaire avec la taille des grains, le canal TM5 une dépendance très marquée avec une saturation de la réflectance pour les gros grains.

CONCLUSION

Nous avons mis en évidence l'influence de la pollution dans le visible et de la taille des grains dans le proche infrarouge. Une meilleure caractérisation des propriétés optiques et physiques du carbone suie ainsi que du paramètre optique de taille des grains de neige est indispensable pour améliorer la modélisation. En plus de ces difficultés, l'étude d'images satellitaires nécessite la connaissance des coefficients d'étalonnage du capteur, des conditions atmosphériques et de la topographie du site observé afin d'en déduire par inversion de la modélisation les paramètres physiques et optiques de la neige. Les résultats de la modélisation pourront alors être comparés aux mesures terrain et aux simulations CROCUS.

BIBLIOGRAPHIE

Brun (E.), David (P.), Sudul (M.), Brunot (G.), 1992 - A numerical model to simulate snow cover statistics for operational avalanche forecasting, *J. of Glaciol.*, vol 38 n°128, pp13-22.

Choudhury (B.J.), Mo (T.), Wang (J.R.), Chang (A.T.C), 1981 - Albedo and flux extinction coefficients of impure snow for diffuse short wave radiation, *Cold region science and technology*, vol 5, pp 119-125.

De Haan (J.F.), Bosma (P.B.), Hovenier (J.W.), 1987 - The adding method for multiple scattering calculations of polarized light, *Aston. Astrophys.*, 183, pp 371-391.

Hapke (B.), 1993 - *Theory of reflectance and emittance spectroscopy*, cambridge university press, pp. 279-283.

Hernandez (B.), Fily (M.), 1994 - Comparaison de données de télédétection avec les résultats d'un modèle de métamorphisme de la neige sur les Alpes, rapport de stage.

Sergent (C.), Pougatch (E.), Sudul (M.), Bourdelles (B.), 1993 - Experimental investigation of optical snow properties, *Annals of Glaciol*, vol 17, pp 281-287.

Warren (S.G.), Wiscombe (W.J.), 1980 - A model for the spectral albedo of snow II: Snow containing atmospheric aerosols, *J. Atmos. Sci*, vol 27, pp 2734-2745.

Warren (S.G.), 1984 - Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave, *Applied Optics*, vol 23, n°8, pp 1206-1225.

World Climate Program, International Association for Meteorology and Atmospheric Physics. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation, W.C.P., March 1986.

**Snow gliding measurements in subalpine
forests and on alpine pastures**
*Mesures de glissement de la neige dans les forêts
subalpines et les pâturages alpins*

P. Höller¹

RÉSUMÉ

Cet article décrit des mesures de glissement de la neige faites dans le cadre de deux projets de recherche dans lesquels nous sommes actuellement impliqués. Des recherches sur le glissement de la neige sur divers sites de forêts subalpines font partie d'un premier projet, intitulé "formation des avalanches dans les forêts de montagne". Le but principal est de découvrir si le glissement de la neige augmente dans les clairières et dans les forêts ayant un couvert faible, ainsi que d'étudier les effets de coefficients de rugosité élevés (ex : nouveaux couloirs d'avalanches). Dans le cadre du projet "Ecologie et culture des écosystèmes alpins" (initié par l'Institut de Botanique de l'Université de Innsbruck), notre institut a été invité à étudier le glissement de la neige sur différentes pentes de pâturages alpins. L'objet de ce projet est de mettre en évidence les conséquences écologiques de l'arrêt des cultures des prairies alpines

Traduction du résumé en français par l'ANENA

ABSTRACT

The paper describes snow gliding measurements on two actual research projects we are just concerned with.

Investigations about snow gliding within different sites of subalpine forests are part of the first project (title: Avalanche formation in mountain forests). Main purpose is to find out if snow gliding is increasing in openings and forests with a low canopy density and to investigate the effects of higher glide rates (e.g. new avalanche tracks).

Within the framework of the project "Ecology and cultivation of alpine ecosystems" (initiated by the institute of Botany of the University of Innsbruck) our institute was invited to investigate snow gliding on different parts of alpine pastures. Aim of the project is to demonstrate the ecological consequences if cultivation is stopped on alpine meadows.

INTRODUCTION

The phenomenon of snow gliding is already known since a long time. While the most projects in the past dealt with the elaboration of methods to protect afforestations from snow gliding (IN DER GAND, 1968a, 1968b), we have to realize that the effects of snow gliding are more different than assumed until now.

1. Snow gliding within subalpine forests

This phenomenon was observed first of all in forests with a low canopy density, especially in



Fig. 1: Snow gliding inside an opening of a larch stand

¹Institut für Lawinenforschung, Hofburg - Rennweg 1, A-6020 Innsbruck
Tel.: ++43 512 573933 Fax.: ++43 512 572820

beech forests of the montane zone (ZENKE, 1985). Meanwhile we found signs of snow gliding in gaps of subalpine forests, too. (fig. 1).

So the investigations of our project concentrated on the following topics: a. Measuring of glide velocity on different sites of subalpine forests in order to find out if snow gliding is increasing in openings and areas with a low canopy density.

b. To demonstrate the effects of snow gliding in mountain forests (new avalanche tracks, extension of hazard zones...)

2. Snow gliding on alpine pastures

In the last years we could notice that cultivation of many pastures was stopped. The consequences are long-bladed grass mats which are found frequently on abandoned areas; moreover snow gliding might be increasing. The occurrence of soil erosion can be an indicator for relevant glide rates. The questions we have to answer in this study are similar to those mentioned above.

a. Measuring of glide velocity on different sites of alpine pastures in order to find out if snow gliding is increasing on abandoned areas.

b. Investigation about the effects of snow gliding on non-cultivated pastures (soil erosion...).

Contents of this paper is topic 1.a. and 2.a.

METHODS OF MEASUREMENT AND STUDY AREA

One of our test areas is located in the Stubai valley at an altitude of about 1900 m, near to the so-called Kaserstattalm. The area is situated on a south-facing slope with an inclination of about 30°.

The forest experimental site is marked with A on fig.2; location B is used for measuring snow gliding on meadows and pastures.



Fig.2: View of the study area (A...forest experimental site, B...location for measuring snow gliding on meadows and pastures)

To investigate glide velocity glide shoes (IN DER GAND, 1954, 1966) were distributed on different measurement points with almost the same inclination and aspect (fig.2). The location of the glide shoes are selected as follows: open field, gap, and dense forest for the forest measurements; moreover four different cultivated areas and one abandoned meadow.

The glide shoes are connected to a Datalogger, which stores all data in regular intervals; snow movements of more than 2 mm can be registered. Supporting measurements include snow and air temperature as well as snow wetness and radiation balance.

RESULTS

Results of the forest measurements (winter 92/93 - fig. 3)

Heavy snowfall between the 16 and 19 Nov 92 led to the first period of increasing snow gliding. Small slides and glide avalanches were observed on almost each location of the study area.

At the beginning of December snow fall rates of more than 60 cm were registered; later on air temperature did increase from -8° to $+8^{\circ}$ in 2000 m. Again we could observe high glide rates as well as slides and glide avalanches; glide shoe no. 8 (inside the opening) was moved several meters downslope caused by a small slide.

In January snow gliding was registered only on the location "open field". Responsible once again was a snowfall period (during the 25 and 29 Jan. 93), although the high glide rates could not be explained until now.

Snowfall between the 16 and 22 Feb. 93 might have been the reason for a further period of high glide rates, although air temperature was below 0° . Glide shoe no. 8 and glide shoe no.5 (this site was influenced by blowing snow) moved down about 200 mm.

In the gap (and including the site of glide shoe no. 5) we found increasing snow gliding at the beginning and then again at the end of March; later on we observed continuous snow gliding up to the end of our measurements (with high glide rates in the middle of April). In all that cases snowfall was responsible for the increasing of glide velocity.

Inside the forest we could observe only slight glide rates.

Preliminary Results of measurements on pastures and meadows (winter 93/94)

The winter 93/94 was characterized by repeated periods with high temperatures.

The first period with increasing temperatures could be observed in the second third of December. The high temperatures and rain up to 2300 m led to the weakening of snow cover; as a consequence we found higher glide rates on some locations of the abandoned area.

The first month in 1994 was characterized by two periods with high temperatures. Both in the first and in the second third we measured temperatures of more than 0° .

Glide velocity was high around the 10th of January, but only on one site of the non-cultivated pasture.

At the beginning of February we observed another period with temperatures of more than 0° . Snow gliding was not relevant (only slight glide rates on the abandoned area).

At the end of February and then again around the 5th of March air temperatures reached values of 10° and more. The result of this was an increasing of snow gliding and significant glide rates on almost all locations of the non-cultivated area.

At the end of March the measurements were finished because snow cover was already melted.

To sum up one can say that glide rates between 50 mm and 130 mm could be registered on the abandoned pasture, but only a few millimeters on the cultivated meadows.

CONCLUSION

In all cases we investigated snow gliding was higher in openings and gaps than inside the forest. Considerable glide rates were noticed on the abandoned pastures, too; in contrast it was almost negligible on cultivated meadows.

High glide rates were observed after periods of snowfall (winter 92/93) and changing (increasing) temperatures (winter 93/94), although this parameter might not influence snow gliding in such a manner as assumed till now.

LITERATURE

In der Gand (H), 1954 - *Beitrag zum Problem des Gleitens der Schneedecke auf dem Untergrund. Winterbericht des Eidgen. Institutes f. Schnee- und Lawinenforschung*, Nr.17, pp. 103-117

In der Gand (H), 1968a - *Neue Erkenntnisse über das Schneegleiten. Schweiz Bauzeitung*, Nr.86/31, pp. 3-7

In der Gand (H), 1968b - *Aufforstungsversuche an einem Gleitschneehang. Mittlg. d. Schweiz. Anstalt f.d. forstl. Versuchswesen*, Nr.44, pp.233-326

In der Gand (H) and Zupancic (M), 1966 - *Snow Gliding and Avalanches. Int. Association Hydrological Sciences*, No. 69, pp. 230-242

Zenke (B), 1985 - *Lawinenstriche im Berwald. Jahrbuch d.Vereins z. Schutz der Bergwelt*, Jhg.50, pp. 49-63

Measurements on avalanche dynamics a new installation

Nouvelle installation pour des mesures sur la dynamique des avalanches

L. Rammer¹

RÉSUMÉ

Dans les gorges du torrent Schnannerbach, dans le Tyrol autrichien, un ouvrage de sédimentation a été construit en 1991/1992. Le mur en béton, en forme d'arc, mesure 13,8 m de haut avec quatre grands exutoires pour la régulation du transport de matière solide.

En hiver, les avalanches du "Jochrücken" et du "Samspitz", descendant le ravin du Schnannerbach atteint cet ouvrage. Par conséquent, cette construction est un excellent support pour l'installation de capteurs de pression dans l'avalanche.

Entre chaque exutoire, nous avons installé un panneau de 1m² pour la mesure de la pression de l'avalanche. Pour chaque panneau il est possible de mesurer et d'enregistrer les contraintes normales et tangentielles (horizontales et verticale) développées par l'avalanche. 2,5m au-dessus de l'ouvrage un anémomètre est installé sur un support spécial pour enregistrer la pression dynamique et atmosphérique de la partie "poudreuse" de l'avalanche passant par dessus le barrage.

Grâce à cet équipement, nous pouvons obtenir la distribution verticale des contraintes exercées par l'avalanche au niveau de l'ouvrage. Cet équipement permet aussi de faire des mesures de l'impact de laves torrentielles sur l'ouvrage.

A une distance de 150 m à l'amont, un pilier en béton armé est installé dans le couloir de l'avalanche, pour supporter un autre capteur de pression, du même type que les précédents, ce qui permet de calculer la vitesse de l'écoulement.

L'enregistrement est effectué électroniquement, interrogeable via un modem.

La majeure partie de l'installation a été faite à l'automne 1994. Celle-ci sera terminée et testée pendant l'été 1995. On peut donc attendre les premiers résultats pour l'hiver 1995-96.

Traduction du résumé en français par l'ANENA

ABSTRACT

In the gorge of the torrent Schnannerbach in Tyrol, Austria, a debris retention dam was constructed in 1991/1992. It was designed as an arched concrete wall, 13.8m high with four large outlets for bedload transport regulation.

In the winter, the Jochrücken-avalanche and the Samspitz-avalanche, coming down the gully of the Schnannerbach, affect this dam. Therefore this structure is an excellent mounting support for measuring devices for recording impact pressures of avalanches.

On each of the cross-bars between the outlets we have mounted a load panel in the size of 1m² for the measurement of the impact of the avalanche loading this panels. The normal load to the panel as well as the shear forces in the horizontal and the vertical direction can be recorded at every panel. 2.5m above the dam-crest an air-speed indicator is mounted on a special support for monitoring the dynamic pressure and the atmospheric pressure of the powder component of the avalanche blowing across the dam. Applying this equipment, we can get the distribution of the avalanche load along the height of the dam.

This equipment also can be used to get measurements of the impact of a debris flow on the dam.

At a distance of 150m upstream, a reinforced concrete pillar is set up in the avalanche track, to hold another load panel of the previous represented type. Taking measurements at two distant points, we can calculate the velocity of the avalanche.

The recording of the measurement data is done by electronic dataloggers, data retrieval by phone.

The major part of the equipment has been mounted in autumn 1994. The installation will be finished and tested in summer 1995. So we can expect first results next winter.

INTRODUCTION

In the torrent Schnannerbach, municipality Pettneu in Tyrol, Austria, a new debris retention dam was constructed in 1991/92 in the shape of an arched concrete wall, 13.8m high. This dam frequently will be affected by the Jochrücken- and Samspitz- avalanches, (Fig. 1) and also by debris flows, and so it was decided to install a measurement equipment for the registration of the effects of these occurrences.

The Instruments are mounted along the whole height of the dam. Therefore in the lower part we can get readings of the impact of the dense flow part of avalanches and of debris flows, in the uppermost part readings of the powder portion of avalanches.

The purpose of this investigations is, to get in the nature measured values and to test the numerical methods for elaborating hazard maps by comparative calculations. Thus this installation will be a substantial step towards objectivication of mapping.

¹ Institut für Lawinenforschung, Hofburg - Rennweg 1, A-6020 Innsbruck, Tel: (43) 512 573933
Fax: (43) 512 572820

INSTALLATIONS

The new debris retention dam has four outlets for bedload transport regulation. On each cross bar between the outlets (Fig. 2) a load Panel in the size of 1m² is mounted for the Measurement of the impact of avalanches loading this panel. The normal load to the panel as well as the shear forces in the horizontal and the vertical direction can be recorded at every panel. (Fig 4 and 5) Applying this equipment, we can get the distribution of the avalanche load along the height of the dam at four points.

In a distance of 150m upstream (Fig. 3) a reinforced concrete Pillar, 3m high, has been set up in the avalanche track. In its uppermost position it holds another load panel of the previous represented type. Taking measurements applied to time at two distant points, we can calculate the velocities of avalanches.

This equipment also is suitable to get measurements of the impact of a debris flow affecting the dam.

2.5m above the dam crest an air speed indicator is mounted on a special support for monitoring the dynamic pressure and the atmospheric pressure of the powder component of the avalanche blowing across the dam crest. Taking the difference between the pressures and assuming a density of the snow-air mixture, we can calculate the velocity of the powder component of the avalanche.

DATA STORAGE AND RETRIEVAL

Control of measurements and data storage is done by programmable dataloggers. The sample rate for every measured value is 8 per second. Normally the loggers are in standby state. In this state data are allocated to a storage area with predefined size, so that 20 seconds of measurement can be recorded. This area is a ring-memory, the newest data always are written over the oldest data.

When an avalanche becomes apparent, i.e. when the normal load exceeds a predefined value, data storage in another storage area is triggered. This memory is configured as fill and stop. it can hold about 6 minutes of measurement data. Controlling the measurements this way all data since 20 seconds before and 6 minutes after the trigger-event are recorded, so that the complete run of the event is measured.

For safety of data a backup of all measured values is done to a battery buffered memory-card. In case of breakdown of the power supply of the dataloggers, data still will be available in the memory-card.

Periodical checks of all the installation, changing of measurement instructions and data retrieval are done by modems and phone line.

POWER SUPPLY AND TELECOMMUNICATION

The nearest possibility to get electric power from the mains supply and also the phone line was in a distance of 450m to the dam. Because of lack of sunshine in the winter to have solar energy at the site, a supply line and a phone line were layed to the dam.

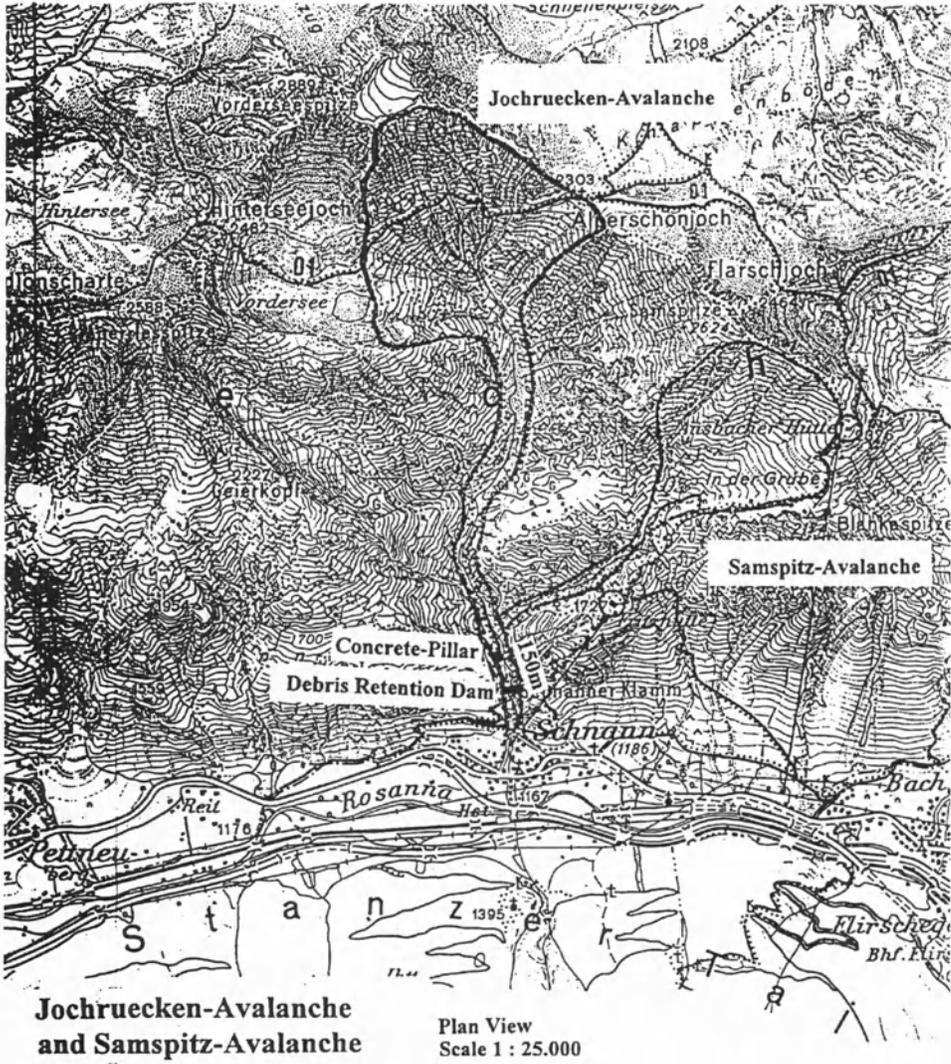
EVALUATION OF MEASUREMENTS

After an avalanche or debris flow has been recorded, the data in the memory of the dataloggers are transferred to a PC by phone. All measured values are applied to time. Using efficient software, the progress of the normal and shear loads to the panels, the pressures and velocities can be presented in diagrams and an interpretation in view of the goals of this investigation can be done.

LITERATURE

- Bachmann (O.), 1988 - *Impuls- und Energieverlust von Schneeblöcken beim Aufprall auf Stützwerke im Lawinenverbau. Schweiz. Z. Forstwesen*, 139, pp. 225-235
- Bakkehoi (S.), Domaas (U.), Lied (K.), 1983 - *Calculation of Snow Avalanche Runout Distance. Annals of Glaciology* 4. pp. 24-29
- Eidgen. Inst. f. Schnee- und Lawinenforschung, 1986 - (Hrsg.): *Internationales Symposium über die Bildung, Bewegung und Wirkungen von Lawinen*, Davos
- Gubler (H.), Hiller (M.), Klausegger (G.), Suter (U.) 1986 - *Messungen an Fließlawinen. Zwischenbericht 1986. Mittlg. des EISLF* No 41
- Hermann (F.), Hermann (J.), Hutter (K.) 1987 - *Laboratory experiments on the dynamics of powder snow avalanches, IAHS-Publ.* No 62, pp. 431-439
- Kawada (K.), Nishimura(K.), Masno (N.) 1988 - *Experimental Studies on a Large-scale Powdersnow Avalanche, Symposium Lom-Norway*
- Lied (K.), Bakkehoi (S.) 1980 - *Empirical Calculations of Snow-Avalanche Run-Out Distance based on Topographic Parameters. Journal of Glaciology*, Vol. 26, No. 94, pp. 165-177
- Salm (B.) 1964 - *Anlage zur Untersuchung dynamischer Wirkungen von bewegtem Schnee. Mittlg. des EISLF* No 21
- Salm (B.) 1966 *Contribution to Avalanche Dynamics. I.A.H.S. Publ.* No 69, pp. 199-214
- Schaerer (P.A.) 1973 - *Observations of Avalanche Impact Pressures. U.S.D.A. Forest Service, Research Paper RM-3*, pp. 51-54
- Schaerer (P.A.) Salway (A.A.) 1980 - *Seismic and Impact-Pressure Monitoring of Flowing-Snow. Journal of Glaciology*, Vol. 26, No 94, pp. 179-187

FIGURES



**Jochruecken-Avalanche
and Samspitz-Avalanche**
Starting Zone and Avalanche Path

Fig. 1: Starting Zone and Avalanche Path

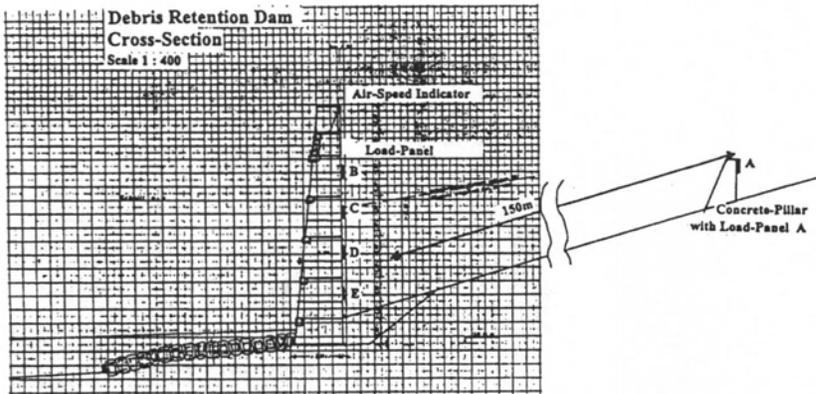


Fig. 2: Debris Retention Dam - Cross Section

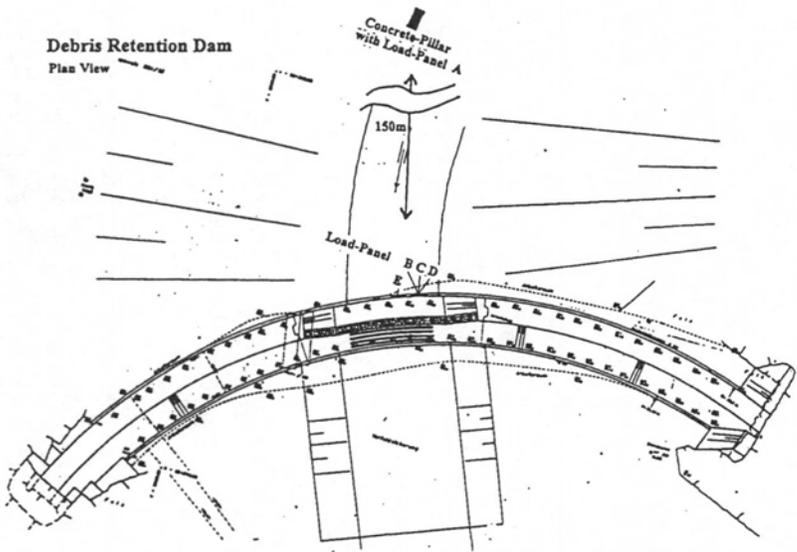


Fig. 3: Debris Retention Dam - Plan View

**Load-Panel
Cross-Section**

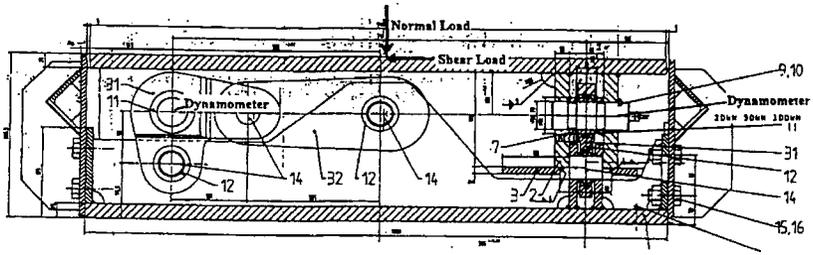


Fig. 4: Load Panel - Cross Section

**Load-Panel
Plan View**

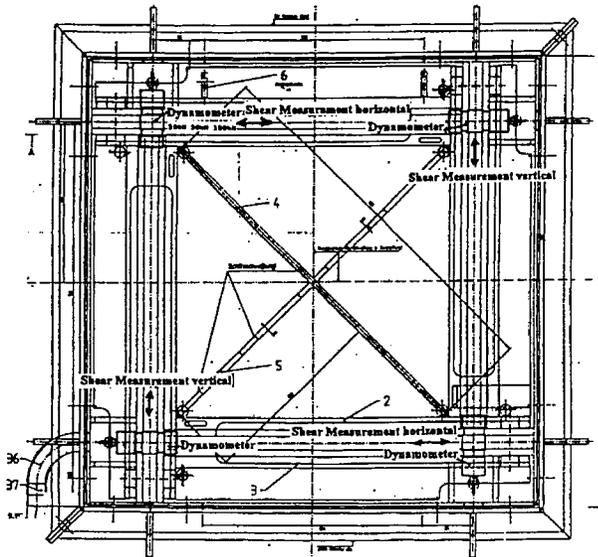


Fig. 5: Load Panel - Plan View

Quelques orientations nouvelles de la cartographie numérique des avalanches

G. Borrel¹

RÉSUMÉ

Cet article traite des documents de type "Carte de Localisation Probable des Avalanches" (CLPA), qui recensent les zones ayant déjà subi le passage d'une avalanche, au dire de témoins sûrs ou d'après les résultats d'une photo-interprétation. Leur révision, à partir de 1989, a été l'occasion d'utiliser de nouvelles méthodes informatiques qui ont facilité leur édition. La conservation de données numérisées nous permettra aussi de produire aisément de futures éditions mises à jour. Cependant, à la lumière de l'expérience acquise, un certain nombre d'ajustements s'avèrent nécessaires. Une meilleure utilisation des données et logiciels disponibles devrait aussi autoriser la production de nouveaux documents avec une présentation améliorée, ainsi que la réalisation semi-automatique de cartes, basée sur l'utilisation des MNT et d'une analyse des formes du terrain.

ABSTRACT

The CLPA (registration maps) have been reprinted since 1989, by using the new computer abilities. The obtained digitized data will be used to print new updated issues. Since drawbacks are still noted, we propose here some improvements in the mapping process. We already tried to semi-automatically produce maps of the starting zones, with the help of a GIS software which allows DEM production and spatial analysis. Furthermore, we put forward some ideas about a new presentation of the map.

INTRODUCTION

En matière de cartographie des risques naturels, on fait souvent la distinction, en France, entre documents législatifs à but réglementaire (les "cartes de risque") et les cartes à vocation informative, dont le but est de recenser la localisation de l'ensemble des événements connus (Choquet, 1995, pp. 15-31). La *Carte de Localisation Probable des Avalanches (CLPA)* à laquelle nous nous intéressons dans cet article appartient sans aucun doute à ce deuxième type de documents.

La première édition des CLPA date de 1970. Ces cartes au 1/20 000 couvraient environ 600 000 hectares des Alpes et des Pyrénées françaises, sélectionnés parmi les plus exposés aux avalanches, en tenant compte de l'importance des installations humaines menacées (gros villages, domaines skiables...). Elles furent entièrement dessinées à la main, de la collecte des données à la réalisation des films d'impression.

Lorsque la décision fut prise en 1988 d'utiliser des données thématiques numérisées pour la publication d'une seconde édition rénovée, au 1/25 000, le but poursuivi était de :

1) profiter de l'apparition de nouveaux moyens informatiques, tant machines que logiciels spécialisés dans le traitement de l'information localisée, en particulier d'ARC/INFO et de *Semio*,

¹ Ingénieur de recherche, Cemagref, Div. Nivologie, BP 76, 38402 St.-Martin d'Hères, France.
Tél. : (33) 76 76 27 10. Fax : (33) 76 51 38 03. E-mail : gilles.borrel@cemagref.fr

l'outil de production de cartes en service à l'Institut Géographique National, notre partenaire dans la production des CLPA dès 1970,

- 2) gagner du temps en évitant de reprendre à zéro tout le travail effectué lors de la première édition, en utilisant en particulier des outils de vectorisation automatique de documents scannés,
- 3) enfin, permettre une mise à jour annuelle simplifiée ainsi que l'impression à un coût réduit des éditions futures.

Ces dispositions nous ont permis de fournir 24 feuilles de CLPA rénovées, diffusées auprès des administrations locales, des services de l'Etat et des professionnels de la neige. Cependant, un certain nombre d'évolutions nous sont apparues nécessaires, afin d'améliorer le processus de production de ces documents. Ceci fera l'objet de la première partie de ce texte.

Il aurait cependant été dommage de ne profiter que partiellement des outils dont nous disposons pour traiter ces données. C'est pourquoi nous nous sommes orientés vers de nouvelles utilisations possibles des données numériques. La deuxième partie de l'article donnera un aperçu sur quelques essais que nous avons déjà conduits, ainsi que sur quelques développements envisageables.

LES ÉVOLUTIONS RÉCENTES DANS LE PROCESSUS DE PRODUCTION DES CLPA

Ces modifications visent à atteindre une réalisation "tout numérique" (ou presque...).

Ceci ne concerne pas la photo-interprétation, toujours réalisée au stéréoscope, ni le report des informations collectées sur le terrain, toujours effectué sur des photos aériennes ou sur une carte papier. Nous n'avons pas encore envisagé de rentrer directement les données sur un ordinateur portable ! Cette phase du travail correspond à ce qui a déjà été exposé dans de précédentes publications (Pietri, 1993 ; Borrel, 1994).

C'est dans la phase de mise en forme des informations, en vue de leur enregistrement, puis de la préparation des films d'impression, que nous avons modifié notre manière de procéder. La méthode adoptée par l'IGN, lors des premières années de la rénovation, comportait les étapes suivantes :

- une réduction photographique des planches thématiques, du 1/20 000 au 1/25 000 ;
- le dessin sur calque, au Cemagref, des modifications de la première édition, avec séparation en plusieurs feuilles : éléments de type zonal (photo-interprétation et enquête + travaux), linéaire (tout) et ponctuel (travaux), soit un total de quatre calques. Cette opération peut produire de nombreux décalages, malgré le soin apporté aux superpositions sur le film du fond topographique ;
- le dessin au propre, à l'IGN de l'ensemble des éléments, ceux de l'ancienne carte comme les modifications, sur une seule série de calques ;
- la scannérisation des calques monochromes, puis la vectorisation automatique des éléments raster ;
- la reprise des fichiers à l'aide du logiciel *Semio* pour ajouter l'habillage de la carte ;
- la réalisation d'un document de contrôle, puis la reprise des corrections, avant impression.

Les fichiers thématiques nous étaient livrés en même temps que la carte imprimée. Une transformation de la présentation des données était nécessaire pour les adapter au format *ARC/INFO*. L'utilisation de la commande *generate* nous permettait de recréer les couvertures. Cependant, le principal inconvénient était que nous ne disposions ni d'une image, ni d'une couverture vecteur du fond topographique. Ceci rendait délicate la lecture à l'écran des informations, par manque de références (topographie...) et nous obligeait à travailler "en aveugle" à la table à digitaliser pour toute modification ultérieure, y compris pour le renseignement des tables attributaires.

C'est pourquoi, après discussion avec l'IGN, nous avons décidé de mieux utiliser les possibilités offertes par *ARC/INFO*.

Les nouvelles étapes du processus décrit ci-dessus sont les suivantes :

- la scannérisation des différentes anciennes CLPA au 1/20 000 entrant dans la composition de la nouvelle feuille, à une résolution de 100µ et la fourniture du fichier sur cartouche, au format Sun

Raster File ;

- le géoréférencement de l'image à l'aide de la commande *register d'Arc* ;
- la vectorisation directe dans *Arccedit* des contours des différents éléments, en suivant à l'aide de la souris les contours apparaissant sur l'image, avec constitution des couvertures correspondantes ;
- la codification simultanée des différents éléments dans les tables attributaires ;
- la fourniture des fichiers à l'IGN où ils sont importés dans le logiciel de production de cartes Mercator. On y ajoute les symboles, opération facilitée grâce au codage préalable, et l'habillage.
- la réalisation d'un document de contrôle, puis la reprise des éventuelles corrections ;

Avec cette nouvelle façon de procéder, certes guère plus rapide, nous nous sommes affranchis des risques d'erreur grâce : au fond scannérisé présent en image d'arrière-plan, à la disparition des calques (problèmes de superposition) et à la suppression de mauvaises interprétations des codes de couleur choisis. Les modifications sont apportées directement en se servant du fond comme guide, ce qui assure un bon positionnement par rapport à l'ancienne thématique. Lors des futures mises à jour le même procédé sera utilisé, de manière plus sûre qu'avec une table à digitaliser.

Enfin, en ce qui concerne l'impression, nous avons envisagé la possibilité de sortir des cartes sur traceur HP 650C. Des essais satisfaisants ont été menés à l'Agence Régionale Rhône-Alpes de l'IGN, à Lyon, sur la petite carte de *Puigmal* (66) : la carte définitive paraîtra au cours de l'été 1995. Le fond topographique a été scannérisé au préalable et sa reproduction reste tout à fait correcte. Le seul obstacle à résoudre est celui de la taille du fichier résultant qui croît avec l'amélioration de la résolution : ainsi, on obtient un fichier de 70 Mo pour une carte de format A3 scannérisée en 40µ et 256 niveaux de gris, seul niveau de précision qui semble donner satisfaction !

Lorsque la procédure sera bien au point, nous envisageons de produire toutes les petites cartes, telles que les zones ajoutées à celles existant déjà, en utilisant le traceur, ce qui réduira considérablement les délais de production.

Ces quelques modifications n'apportent somme toute que peu de changements à nos activités traditionnelles. L'achat de matériel informatique performant (station de travail *Sun Sparc 10* avec 64 Mo de mémoire RAM) et la disponibilité de la version 6.1 d'*ARC/INFO* nous a permis d'envisager d'aller plus loin dans l'utilisation des données numériques. Bien que quelques essais concluants aient déjà été menés, il ne s'agit que d'idées en cours de mise en application à la Division Nivologie du Cemagref. Elles font encore l'objet de plusieurs travaux de recherche inachevés.

LES NOUVELLES ORIENTATIONS

Celles-ci concernent :

La mise à jour et la conservation des données anciennes

Lors des dernières opérations de mise à jour, que ce soit celle effectuée lors de la rénovation ou celles des sessions annuelles de modifications, nous avons modifié nos fichiers de contours d'avalanches et de travaux de protection sans garder trace des limites précédentes. Nous étions toujours dans une logique de production de documents sur papier qui nous imposait de ne garder que les contours définitifs. A la réflexion, il nous est apparu que l'affichage de cartes numérisées à l'écran, ce qui permet de s'affranchir des problèmes d'échelle, autorisait la conservation de toutes les limites anciennes et leur consultation aisée. Ce genre de renseignement est très intéressant s'il s'agit de suivre l'évolution des limites des avalanches dans le temps ou de conserver trace de l'année de survenue d'un événement exceptionnel (puisque'il a dépassé les limites maximales de l'avalanche

connue en ce lieu) ainsi que des implantations annuelles de travaux de protection. C'est pourquoi, à compter de cette année 1995, nous allons enregistrer les modifications résultant des événements de la dernière saison d'hiver, d'une part sous forme d'une mise à jour de nos couvertures existantes, d'autre part sous forme de nouvelles couvertures, où les éléments, tant anciens que nouveaux, seront dotés d'un attribut "*date_de_mise_à_jour*". Cette modification nous permettra d'améliorer notre perception des phénomènes. Elle ira de pair avec la mise en place d'une base de données "*Avalanches*" consultable dans l'environnement *ARC/INFO*.

La création d'une base de données "Avalanches"

Nous disposons d'un énorme fichier d'archives concernant les observations par les agents de l'ONF (Office National des Forêts) des événements ayant affecté certains couloirs de la plupart des communes des Alpes et des Pyrénées. Il s'agit du fichier *EPA* (Enquête Permanente sur les Avalanches). Ce fichier séquentiel de plus de 50 000 enregistrements, dont les plus anciens remontent à 1898, est en cours de transfert dans une base de données relationnelle dont le schéma est déjà défini (Lutchmun, 1994). Le SGBD (Système de Gestion de Base de Données) utilisé, *RDB*, est peu pratique d'emploi. C'est pourquoi, tout en améliorant l'architecture actuelle de la base, nous serons équipés dans l'été avec un SGBD plus convivial, et surtout qui permette d'adresser des requêtes directement depuis l'environnement *ARC/INFO*. Ceci nécessitera un travail préliminaire important de mise en correspondance des couloirs de l'*EPA* avec ceux de la *CLPA*. Ceci pose quelques problèmes, puisque la première concerne certains sites sur toutes les communes du territoire de haute montagne, alors que la seconde répertorie toutes les avalanches de certaines portions du territoire seulement. De plus, les numéros affectés aux différents sites ne correspondent pas et les contours diffèrent souvent...

Lorsqu'une table de correspondance aura été établie, nous pourrons associer aux données spatiales relativement précises de la *CLPA* les précieuses informations historiques de l'*EPA* (date de l'événement, situation météo dans les 3 derniers jours, type d'avalanche selon la classification internationale, dégâts...). Ceci améliorera la consultation des données à l'écran par les experts ou les chercheurs. Cette mise en place est menée dans le cadre d'une réflexion sur les possibilités d'harmonisation de la présentation des données concernant les avalanches, au niveau européen. Ceci implique que les logiciels utilisés soient compatibles. Des échanges de points de vue ont déjà eu lieu avec nos collègues de Catalogne et d'Islande où les travaux sont plus avancés (Martí *et al.*, 1995 ; Magnússon, 1994, pp. 314-326).

Les essais de détermination automatique des zones de départ d'avalanches

Au-delà de la simple amélioration de la gestion des données, nous avons entrepris des recherches dans le domaine de l'analyse spatiale, à partir de données numériques donnant une excellente définition du terrain : la couche "courbes de niveau" (équidistance : 10 mètres) de la nouvelle *BD Topo* de l'IGN. Elles résultent de la rénovation complète des données permettant d'éditer la carte de base française. L'IGN a entrepris une stéréo restitution numérique de tout le territoire, avec une finesse du détail compatible avec la réalisation de cartes à échelle moyenne (1/5 000 à 1/10 000). Nous avons cherché à profiter de cet avantage, car toute étude du relief en vue de la délimitation de zones de déclenchement d'avalanches exige une grande précision dans la définition des micro-formes du terrain. Les zones de forêt dense étant peu propices au déclenchement des avalanches, peu importe que la précision des courbes y soit parfois moins bonne.

Les premiers essais ont été conduits en 1994, lors d'un stage de DESS (Martin, 1994). Ils seront

repris en 1995. La zone d'étude choisie fut le versant de Crève Tête, au-dessus de la station de Valmorel (Savoie). L'idée de départ fut la suivante : essayer de déterminer les zones les plus propices au déclenchement d'avalanches à l'aide d'un Modèle Numérique d'Élévation et à partir de critères simples concernant les facteurs topographiques favorables, l'objectif ultime restant de délimiter automatiquement ces zones.

Les premières règles choisies, sans vérification préalable (celle-ci reste à faire) de leur pertinence, furent :

- les zones de pentes favorables au déclenchement ont un angle compris entre 30° et 50° ;
- en ces zones, un accroissement de l'angle de pente vers l'aval de plus de 10° est très favorable ;
- afin d'éviter les zones en "marches d'escalier", peu propices, nous avons convenu que la pente devait garder son angle sur au moins 30 mètres à l'aval pour qu'elle reste favorable.

Les premiers tris (pente) sont effectués en utilisant le module *TIN* qui permet de représenter le terrain par un réseau de triangles où les lignes les plus marquantes du relief sont conservées. Chaque petite facette obtenue est un polygone dont on connaît l'angle de pente et la position à l'amont ou à l'aval de ses voisins. Le résultat brut du tri selon les pentes favorables n'est pas très satisfaisant : de nombreuses zones trop petites sont éliminées (commande *eliminate* d'*Arc*), tout comme les zones filiformes, supprimées selon un procédé courant en traitement d'image : l'érosion/dilatation. Pour cela, on transforme le réseau de triangles en un réseau de mailles et on utilise les commandes *shrink* et *expand* du module *Grid*. D'autres, petites zones ne répondant pas au critère, apparaissent au milieu de zones favorables : elles sont agrégées à ces dernières (fig. 1).

Les zones situées en forêt doivent être éliminées par intersection des zones résultant de ce premier tri avec une couverture des zones de végétation peu favorable, résultant d'une photo-interprétation de photos aériennes en couleur, qui peut être complétée par une visite de terrain.

Le résultat obtenu (fig. 2) est déjà satisfaisant. Nous avons essayé de l'affiner.

Pour cela, nous avons introduit les zones de rupture de pente.

Ce travail est effectué dans le module *TIN*. On sélectionne les arcs, côtés horizontaux de triangles

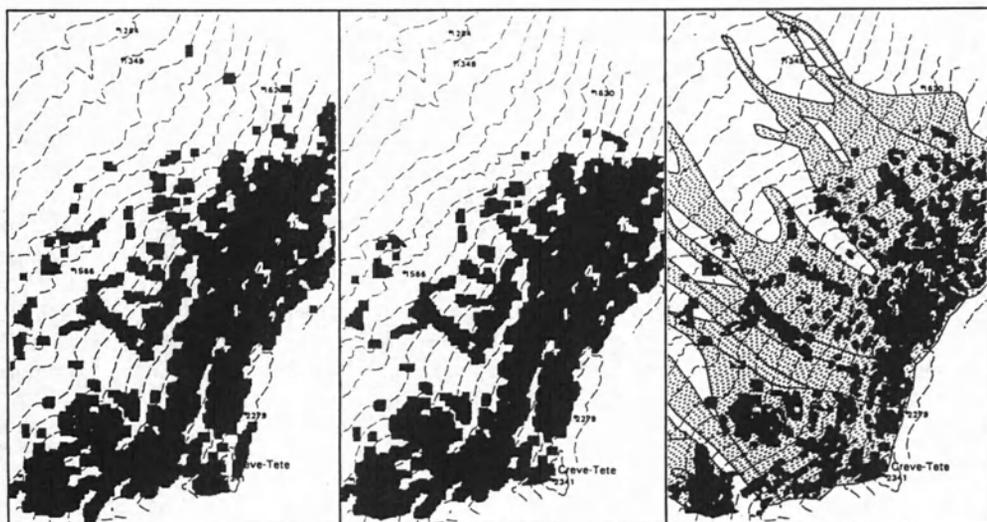


Fig. 1 : Carte des pentes avec suppression des zones trop petites

Fig. 2 : Intersection de la carte des pentes et des zones de végétation

Fig. 3 : Intersection de la carte précédente avec les zones de rupture de pente et la CLPA

(tronçons de courbes de niveau), qui répondent à la condition :

$$\text{angle de pente triangle amont} \leq \text{angle de pente triangle aval} - 10^\circ.$$

Afin de conserver des zones à la suite de l'intersection finale entre les surfaces de pentes sélectionnées et ces arcs, nous ajoutons un buffer arbitraire de 20 mètres autour de ceux-ci. Le croisement des deux couvertures produit un premier document très intéressant que nous avons comparé à la CLPA du secteur : le recouvrement est satisfaisant (fig. 3, page précédente).

Le document obtenu peut donc aider tant le photo-interprète que l'enquêteur, qui pousseront particulièrement leurs investigations sur les zones où le recouvrement existe. Un travail complémentaire, mené dans *Grid* nous permet de pousser les exigences sur les conditions à la rupture de pente. Il nécessite un choix de taille des cellules délicat, entre la trop petite où l'on est tributaire d'interpolations sans grande signification, et la trop grande où l'on "gomme" les détails utiles du relief. Une utilisation très poussée des capacités du module *Grid*, ainsi qu'une programmation complémentaire en langage C sont nécessaires.

Le résultat de cette dernière partie est à reprendre, car les premiers résultats n'apportaient que peu d'informations supplémentaires. Il reste aussi à mener des investigations sur d'autres formes de relief caractéristiques, telles les zones de creux ou celles sous le vent des crêtes, réputées favorables à l'accumulation de la neige. Celle-ci joue un rôle important dans le déclenchement des avalanches. Le rôle du vent, tout comme celui de la végétation, est à estimer en dehors de l'analyse du MNT. Nous sommes obligés, là aussi, de faire des choix qui peuvent être discutables.

Une nouvelle présentation

La présentation de la CLPA est sans nul doute perfectible. Nous envisageons d'entreprendre ce travail afin d'assurer un avenir à ce document et de le rendre plus informatif, en coordination avec les travaux identiques menés dans d'autres pays : Italie, Islande, Espagne (Catalogne et Aragon), Turquie, sur des cartes de même type, sans négliger pour autant l'étude des choix effectués ailleurs : Suisse, Autriche, Norvège...

Ainsi, il faudra absolument modifier la légende afin de mettre celle-ci en accord avec les règles de la sémiologie graphique, et éviter de fréquentes erreurs d'interprétation. Ceci concerne particulièrement les zones hachurées, souvent désignées par l'utilisateur, même averti, comme moins dangereuses, à cause de leur couleur moins intense.

L'utilisation d'un module de cartographie comme *Arcplot* autorise l'ajout d'éléments informatifs supplémentaires, sans modifier l'échelle choisie. Par exemple, l'indication de la limite de l'avalanche dite annuelle...

Une réflexion doit être aussi menée sur la délimitation de l'emprise des avalanches aérosol. Elles sont mal reportées actuellement, faute de limites précises, visibles sur le terrain après leur arrêt : il est toujours difficile, voire impossible, de faire la part des choses entre zone de dépôt et de simple "souffle" sans véritable transport de neige...

CONCLUSION

La Division Nivologie du Cemagref, héritière de tout le passé des CLPA, devra assurer la pérennité de ce document original, de préférence dans un cadre européen. Une évolution de la carte actuelle apparaît nécessaire. L'utilisation de données numériques présentera un avantage considérable dans le développement des quelques "pistes" présentées ci-dessus.

BIBLIOGRAPHIE

- Borrel (G.), 1994 - La Carte de Localisation Probable des Avalanches, *Mappemonde*, Les Risques Naturels, n° 4/1994, pp. 17-19.
- Choquet (A.), 1995 - *Recherche d'une méthodologie adaptée à l'élaboration des cartes multirisques à vocation informative*, mémoire de DEA "Analyse Géographique du Milieu Physique", Université de Lille I, septembre 1995.
- Lutchmun (A.), 1994 - *Conception d'une base de données sur les avalanches*, rapport de fin d'études, IMAG/MIAG, Université Joseph Fourier, Grenoble, 39 p. + annexes (15 p.).
- Magnússon (M. M.), 1994 - A relational database for snow avalanches, *Proceedings of the International Snow Science Workshop '94*, Snowbird, Utah, USA, 679 p.
- Martí (G.), Oller (P.), Bisson (B.), Gavalda (J.), García (C.), Martínez (P.), 1995 - Project of elaboration of a cadastre of the avalanche paths in the Catalan Pyrenees, *Actes du Symposium international "Neige et Avalanches" de l'ANENA - Chamonix - 1995*, Grenoble.
- Martin (G.), 1994 - *Cartographie automatique des zones de départ d'avalanches*, rapport de stage de DESS de Cartographie Numérique, Université de Paris I - ENSG, 85 p.
- Pietri (C.), 1993 - Rénovation de la carte de localisation probable des avalanches, *Revue de Géographie Alpine*, n° 1-1993, tome LXXXI, pp. 85-97.

Effet d'une digue sur l'écoulement d'un aérosol

A. Auge, F. Ousset, O. Marco¹

RÉSUMÉ

Les avalanches aérosols font l'objet d'une modélisation physique dans une cuve. Le nuage turbulent de particules est représenté par de l'eau salée, et l'air ambiant par de l'eau. On montre l'influence d'une digue, construite au départ pour arrêter les écoulements denses, sur un tel écoulement. P. Beghin avait déjà souligné le côté positif (forte dissipation d'énergie) [Beghin et Closet, 1990], nous montrons ici les aspects plus négatifs : modification du risque à l'aval et sur les côtés de la digue. La longueur du sillage est indépendante de la vitesse de l'aérosol. Elle est donnée en fonction de la hauteur de la digue. L'accroissement en hauteur est uniquement fonction de la hauteur de la digue. L'accroissement latéral est tel, que nous avons étudié un dispositif pour tenter de la réduire. Nous proposons enfin de nouvelles expériences permettant de valider, préciser et élargir les résultats trouvés.

ABSTRACT

Powder snow avalanches are studied by physical modelisation in a water tank. The turbulent cloud of particles is represented by salt water, and the surrounding air by water. We show the influence of a dam, built at the beginning to stop dense flow avalanches, over such powder snow avalanches. P. Beghin already showed positive effect (important dissipation of energy) [Beghin et Closet, 1990], we show here negative effects : modification of the hazard downstream from the dam and beside it. The wake length is independent of the cloud speed. The increase in height is only function of the height of the dam. The lateral increase is so important that we studied a device to try to reduce it. We propose at last, new experiments to validate, specify and broaden the results found.

INTRODUCTION

Concernant les aérosols, les études sur sites sont rares, alors que la modélisation physique développée au Cemagref depuis une quinzaine d'années, a permis de mieux connaître leur dynamique d'abord en 2 dimensions ([Tochon-Danguy et Hopfinger, 1977], [Beghin et al., 1981] et [Beghin et Brugnot, 1983]), puis en 3 dimensions ([Beghin et Olagne, 1991]).

La deuxième phase de cette expérimentation concerne l'interaction entre les écoulements et les obstacles. Les études de Beghin à la fin des années 80 ont montré que contrairement aux croyances généralement admises, une digue placée dans la zone d'arrêt d'une avalanche pour arrêter les avalanches coulantes, permettait aussi de réduire nettement l'énergie d'un aérosol : une hauteur de digue de 15% de la hauteur de l'aérosol permettait de dissiper la moitié de son énergie [Beghin et Closet, 1990]. Dans cet article nous chercherons à savoir, si à côté de cette action positive, une digue n'aggrave pas le risque dans certaines zones, en créant de nouvelles turbulences ou en augmentant l'emprise spatiale du nuage.

C'est pourquoi, après avoir décrit le protocole expérimental, nous exposerons les résultats en 2 parties : étude de la zone perturbée à l'aval de la digue, puis de la croissance du nuage due à la digue. Enfin, nous discuterons ces résultats et verrons les perspectives.

¹ Cemagref, Division Nivologie, 2 rue de la Papeterie, BP 76, Campus Universitaire Grenoble, 38402 Saint Martin D'Heres, Tél : (33) 76-76-27-27, Fax : (33) 76-42-81-66.

I. LE MODÈLE PHYSIQUE

I.1. Principe de modélisation

Dans une cuve remplie d'eau, l'aérosol est simulé par une eau salée et colorée. Tochon-Danguy et Hopfinger ont montré la validité d'une telle expérience, moyennant le respect de deux paramètres : le nombre de Froude densimétrique et le rapport de densité [Tochon-Danguy et Hopfinger, 1977].

Le nombre de Froude densimétrique a pour expression :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gh}}$$

v : vitesse de référence, généralement celle du front.

$\Delta\rho = \rho - \rho_a$ ρ : masse volumique moyenne au sein de l'aérosol

ρ_a : masse volumique du fluide ambiant

h : hauteur de référence (généralement la hauteur de l'écoulement ou de la digue)

et le rapport de densité : $\Delta\rho/\rho$

Si le nombre de Froude peut-être respecté, il n'en est pas de même pour le rapport de densité pour deux raisons :

- La différence entre la masse volumique de l'aérosol ($\approx 10 \text{ kg/m}^3$) et de l'air ($\approx 1 \text{ kg/m}^3$) est beaucoup plus importante qu'entre l'eau salée ($\approx 1\ 200 \text{ kg/m}^3$ maximum) et l'eau ($\approx 1\ 000 \text{ kg/m}^3$).
- Pour obtenir les vitesses voulues il faudrait des cuves de très grande dimensions.

Il y a donc une distorsion dans les densités. Les profils des vitesses en sont affectés mais pas les autres paramètres. Ainsi, pour les vitesses, nous ne donnerons que des résultats qualitatifs. Les autres résultats seront présentés en fonction d'une donnée constante tout au long de l'expérimentation, la hauteur de l'aérosol à l'amont immédiat de la digue, H_0 .

Il faut noter dès à présent qu'un tel modèle n'a pas l'ambition de représenter la réalité dans toute sa complexité (topographie) mais plutôt de donner des résultats dans des conditions idéales (plan infini) et bien définies. Ce sera ensuite à l'expert à les adapter à la complexité d'un site.

On notera enfin que l'on se place dans des conditions où il n'y a pas de reprise de neige au sol.

I.2. Expérience

L'expérience se déroule dans une cuve de 20 m^3 remplie d'eau dont l'équipement est représenté dans la figure 1.

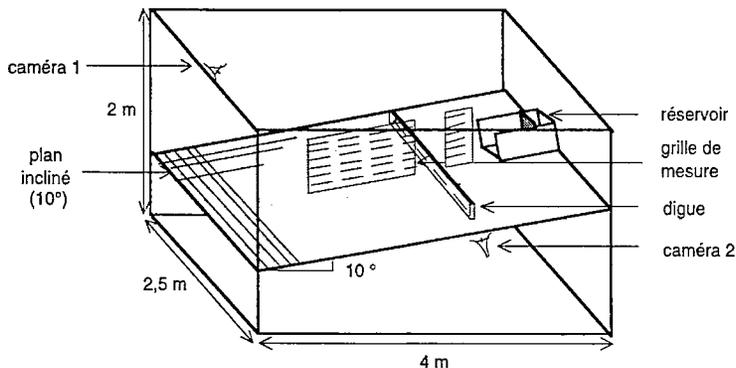


Figure 1:
Equipement de la
cuve pour
l'expérience

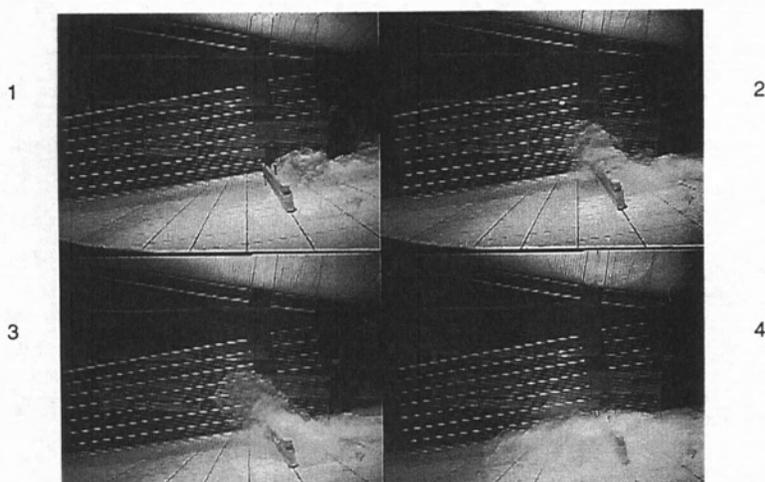
L'inclinaison de 10° est constante. Cela représente dans la réalité 20° environ. L'écoulement est canalisé sur 70 cm pour représenter un couloir. La digue a une hauteur variable de 10 à 60 % de H_0 . Pour chacune de ces hauteurs, une dizaine d'expériences ont été réalisées avec des densités variant de 1,03 à 1,2, et représentant une large gamme de vitesses. Le volume de solution injecté est de 2 litres généralement colorés avec de la fluorecéine (jaune). Pour certaines expériences, nous avons remplacé la fluorecéine par des particules qui, éclairées en lumière blanche et dans des conditions de noir complet, nous ont permis de visualiser les lignes de courant à l'intérieur du nuage.

II. RÉSULTATS

II.1. Evaluation de la distance perturbée

a) Description du phénomène

Au niveau de la digue on assiste à différents phénomènes montrés, puis expliqués ci-dessous (cf. montage de photos) :



Montage de photos : Perturbation créée par la digue sur l'écoulement (digue 60% H_0 et densité 1,12)

- La photo 2 montre la croissance en hauteur du nuage, alors que dans la partie basse, un détachement a lieu créant une dépression à l'aval de la digue.
- Sur la photo 3, la hauteur maximale est atteinte. Dans la partie basse, des tourbillons inversés viennent combler la dépression. Dans la réalité, cela correspond au "plâtrage" des façades à l'aval des maisons, fréquemment observé.
- Sur la photo 4, la partie haute retombe alors que l'ensemble de l'écoulement reprend un cours non perturbé. On appellera ce dernier phénomène la "relance".

Quand l'aérosol reprend son cours non perturbé, la vitesse et la densité sont nettement amoindries. L'écoulement présente alors beaucoup moins de danger. Ce n'est pas le cas dans la zone entre la digue et la relance, à cause de l'alternance de dépression et de tourbillons. On cherche à évaluer la distance nécessaire à la relance afin d'éviter si possible toute construction dans cette zone.

b) Evaluation de cette distance

Cette distance a été relativement facile à déterminer puisque les deux phénomènes, reprise du sens non perturbé des tourbillons et retombée de la partie supérieure, s'effectuent au même endroit. Ils sont seulement décalés dans le temps.

Nous avons trouvé que cette distance D , est quasiment constante quelle que soit :

- la densité, donc la vitesse de l'aérosol,
- la hauteur de la digue.

Ainsi, si l'on prend comme hauteur de référence la hauteur de la digue puisqu'à l'origine, la digue est construite pour arrêter les avalanches denses, on obtient les résultats consignés dans la figure 2, dans laquelle chaque point représente la moyenne sur une dizaine de mesures.

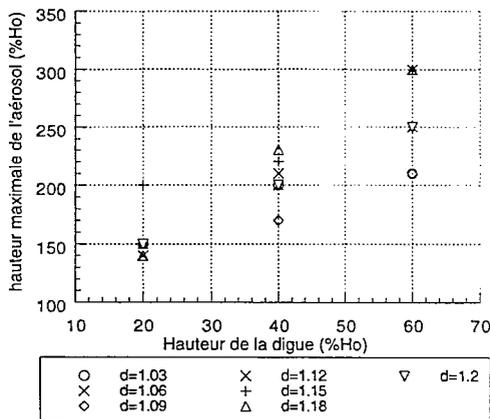
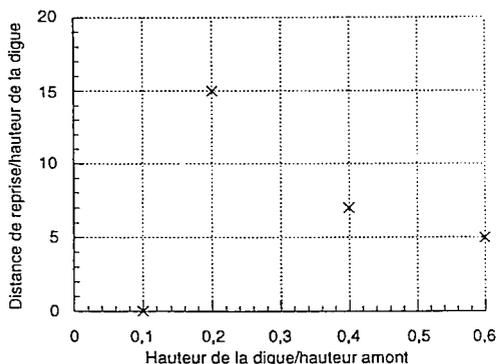


Figure 2 : Distance de relance du cours normal de l'aérosol en fonction de la hauteur de la digue, valeur moyenne pour l'ensemble des densités

Figure 3 : Hauteur maximale de l'aérosol en fonction de la hauteur de la digue

Nous remarquons que ces résultats concernent des hauteurs de digue de 20 à 60% de la hauteur de l'aérosol. Cette fourchette n'est peut-être pas suffisante pour appréhender l'ensemble du phénomène d'autant plus que nous estimons la précision de nos mesures à 10 à 20%. Des mesures ultérieures devront donc être effectuées.

II.2. Accroissement de l'avalanche dû à la digue

a) En hauteur

Cet accroissement est uniquement fonction de la hauteur de la digue et il est indépendant de la vitesse. Les résultats trouvés sont représentés sur la figure 3. En fait ce phénomène, bien que spectaculaire, n'est pas très menaçant, sauf peut-être pour des pylônes qui pourraient se trouver dans cette zone.

b) Latéralement

Cet accroissement est beaucoup plus important pour les constructions. Au départ, on pensait que la digue aurait une longueur infinie par rapport à la largeur de l'aérosol (elle fait 600 m de long à l'échelle 1/500^{ème}). Or, on s'est aperçu que le débordement était beaucoup plus important que prévu (le nuage débordait même le plan incliné et remontait sur les parois de la cuve) et qu'il se faisait de plus avec une vitesse relativement importante de la moitié de la vitesse amont (cf. Figure 4)). L'écoulement pouvait donc menacer des zones qui au départ ne l'étaient pas et de façon non négligeable.

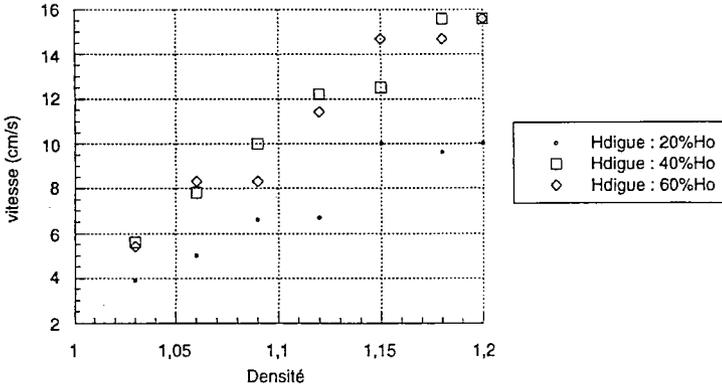


Figure 4 : Vitesse le long de la digue pour les différentes hauteurs de digue en fonction de la densité

Nous avons donc cherché à le réduire en ajoutant des plots en amont de la digue. Ils ont deux buts :

- freiner l'écoulement le long de la digue. Ils ne sont d'ailleurs pas très longs (environ la hauteur de la digue) puisque l'essentiel de l'écoulement a lieu près de la digue.
- stocker de la neige pour limiter en volume le débordement.

La figure 5 schématise l'action de ces plots :

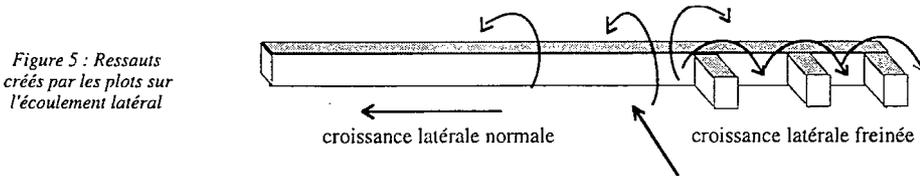


Figure 5 : Ressauts créés par les plots sur l'écoulement latéral

Les plots n'ont été placés que d'un côté, à titre comparatif.

On s'aperçoit que ce dispositif ne permet pas d'éliminer le débordement. Il a quand même deux actions positives essentielles :

- la vitesse est réduite de moitié en moyenne,
- le volume qui déborde est moins important.

Pour la vitesse, ce sont surtout les deux plots du centre qui sont le plus efficaces (cf. Figure 6). Ce sont plutôt les deux extrêmes qui le sont pour le volume de neige stocké.

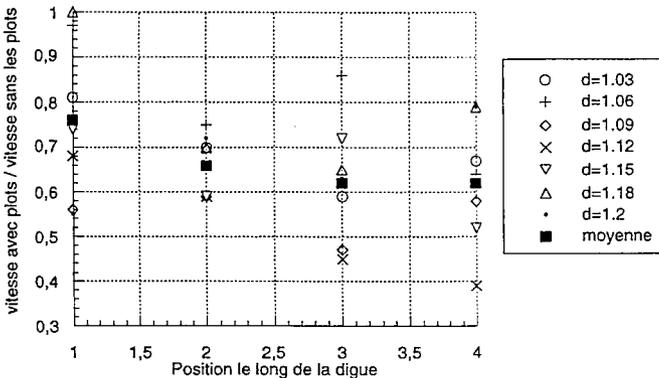


Figure 6 : vitesse avec plots / vitesse sans plot le long de la digue pour toutes les densités

III. DISCUSSION DES RÉSULTATS, PERSPECTIVES

Nous avons vu dans le paragraphe II.1.b. qu'il sera nécessaire d'effectuer d'autres mesures pour mieux comprendre l'ensemble du phénomène. Pour cela, nous avons la possibilité de faire varier la hauteur de la digue en gardant le même dispositif expérimental et donc la même hauteur H_0 . Nous pouvons aussi augmenter la hauteur de l'aérosol. Or, le taux d'accroissement (variation de la hauteur de l'aérosol / variation de la distance au point d'injection) est une fonction linéaire de la pente. Si nous augmentons sensiblement la pente pour faire varier cette hauteur, nous nous éloignons des angles d'une zone d'arrêt. La solution est peut-être d'éloigner la digue du point d'injection, puisqu'en doublant cette distance, on double également la hauteur H_0 . Cela, nous permettrait en outre, de vérifier que l'on obtient bien les mêmes résultats si l'on garde une hauteur constante et que l'on fait varier la hauteur de la digue, ou si l'on fait le contraire.

D'autres perspectives de recherche seraient d'élargir ces résultats en variant la forme de la digue, en prenant par exemple un fruit non nul, ce qui se rapprocherait plus de la réalité. On pourrait aussi simuler un dépôt d'une précédente avalanche qui donne une forme de tremplin à l'amont de la digue.

CONCLUSION

Les effets d'une digue sur un aérosol ne sont pas négligeables et le praticien se trouve alors dans une situation délicate puisque pour être le plus efficace possible pour les avalanches denses, il faut placer la digue le plus près possible des zones à protéger. Mais, il faut être relativement loin en cas d'aérosol pour éviter la zone perturbée.

Ces résultats pourront servir de données pour l'établissement de modèles numériques pouvant prendre en compte des accidents de terrain tel qu'une digue de 10 m de haut. Il reste néanmoins, de nombreuses situations et hypothèses à étudier.

RÉFÉRENCES

- Beghin (P.), Hopfinger (E.J.) et Britte (R.E.), 1981, - Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries, *J. Fluid Mech.*, 107, pp.407-422
- Beghin (P.) et Brugnot (G.), 1983, Contribution of theoretical and experimental results to powder snow avalanche dynamics, *CREEL Rev.*, 8, pp.67-73
- Beghin (P.) et Closet (J.-F.), 1990 - Effets d'une digue sur l'écoulement d'une avalanche poudreuse, *Informations techniques du Cemagref*, n°77, note 3.
- Beghin (P.) et Olgne (X.), 1991, - Experimental and theoretical study of the dynamics of powder snow avalanches, *Cold Regions Science and Technology*, 19, pp.317-326
- Tochon-Danguy (J.C.) et Hopfinger (E.J.), 1977, A model study of powder snow avalanches, *J. of Glaciology.*, 19, pp.343-356

Snow pressure measurements on snow net systems - *Mesures de la pression exercée par la neige sur les filets paravalanches*

S. Margreth¹

RÉSUMÉ

D'abord un aperçu est donné des filets paravalanches appliqués aujourd'hui en Suisse. Puis le calcul des efforts dans les filets d'après la méthode de Haefeli (1954) et les Directives suisses est présenté. Pour améliorer et contrôler ces méthodes on a installé depuis l'hiver 1990/91 trois filets qui sont instrumentés avec des capteurs. On mesure les forces de pression dans les piliers et les forces de traction dans les deux tirant amont du filet et dans le tirant aval. Pendant l'hiver 1994/95 on a mesuré les forces maximal jusqu'à aujourd'hui: 95kN dans le pilier, 70 et 74kN dans les tirants amont et 39kN dans le tirant aval. Le filet était rempli de 3.5m de neige. Le résultat le plus important est que la direction de la résultante de la pression de neige mesurée et beaucoup plus raide qu'après les Directives. La conséquence est qu'on surestime les forces de traction aux tirants amonts et qu'on sous-estime les forces de pressions dans les piliers.

ABSTRACT

At first an overview is given of the steel wire rope net systems used today in Switzerland. Triangular shaped nets are supported by flexible posts. Then a summary of the static calculations according to a method proposed by Haefeli in 1954 and the Swiss guidelines is given. For the validation of the calculation method since winter 1990/91 3 nets have been equipped with gauges. The 3 tension forces at the foundations and the pressure force at the support are measured automatically. The maximal forces were recorded in winter 1994/95: 95kN pressure in the post, 70 and 74kN at the upper anchor and 39kN at the lower anchor. The most important result is that the angle of the resultant snow pressure and the direction parallel to the ground is much larger than according to the guidelines. The consequence is that the upper anchor force is overestimated and the pressure force in the post is underestimated.

INTRODUCTION

Supporting structures are built in the starting zone to prevent avalanches or at least to limit snow motions to a harmless magnitude. Rigid snow bridges or snow rakes and flexible snow nets are common. The supporting plane of snow nets consists of flexible steel wire rope nets instead of stiff crossbeams. The main characteristics of snow net supporting structures used today in Switzerland are (see fig.1):

- The steel wire rope nets are triangularly shaped. They consist of thicker marginal ropes and smaller mesh ropes. The mesh size is 25cm. To ameliorate their retarding effect and arresting capability, stripes of dense wire mesh are laid diagonally over the supporting plane.
- The nets are fixed to the top of the swivel posts and to the anchors. A guy is used to hold the posts. The distance between the posts is 3.5m. The steel post can move freely in all directions on a ball joint. The footings of the posts are usually made with micropiles and anchors or concrete socles. For the upper and lower tension footings wire rope anchors with a special protection against corrosion are used.
- Snow nets are designed for a range of snow thicknes from 2.0m up to 4.0m. Modular systems with simple fastening of the nets allow to assemble as many nets in a row as necessary.

¹ Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research
CH-7260 Weissfluhjoch/Davos, Tel.+41+81 417 02 54/e-mail:margreth@slf.ch

Steel wire rope net systems are applied especially in avalanche starting zones with rockfall problems and where the visual impact on the landscape has to be small. Snow net systems are widely used today.

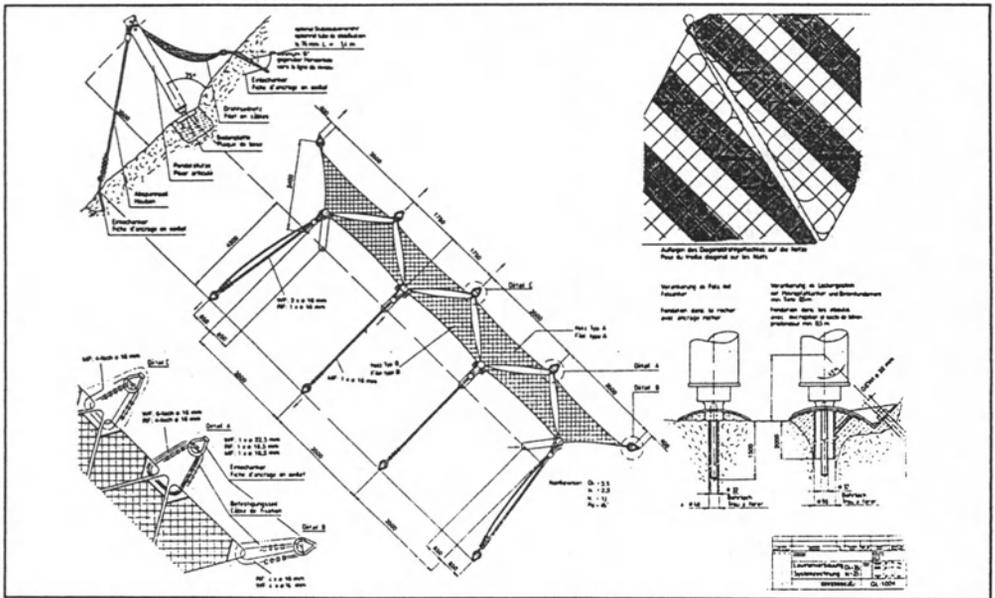


Fig.1: Principles of the GEOBRUGG snow net system

DESIGN OF SNOW NETS

Since 1951 snow nets are applied in Switzerland. The first years were characterized by many failures (bent steel posts, broken anchors and cables). The development was purely an empirical one. Damages were recorded and the manufacturers produced stronger elements. In 1954 Haefeli made a first attempt of designing snow nets systems, but his approach was not applied in practice at the beginning. His rather simple method is still the basis for the calculation of snow net systems according to the Swiss guidelines "Avalanche Control in the Starting Zone" (BU-WAL/WSL, 1990). Haefeli himself called for validation of his proposal by field measurements. The essential difference between the reaction of a structure with a rigid and flexible supporting plane is, that snow creeping and gliding by a flexible structure is only partly interrupted. The retarding effect of a snow net begins with a delay. The flexible net can be deformed by the creeping and gliding snow until it is completely stretched. The shape of a net depends also on the snow characteristics and the layering of the snowpack.

The reduction of the snow pressure as a result of the flexibility of the supporting plane is taken into consideration by using a reduction factor. This factor depends on the gliding of the snowpack on the ground, on the slack, shape, inclination and mesh width of the net.

The components of the snow pressure (see fig.2) on a net in the middle of a line of structures (without edge effect) are according to the Swiss guidelines (Art.55):

- Snow pressure parallel to the slope:

$$S_N = f_s \cdot H_K^2 \cdot N \cdot f_c \quad [\text{kN/m}']$$

f_s :	0.8, reduction factor for a flexible supporting plane [-]
H_K :	extreme snow depth at the site of the structure [m]
N :	glide factor 1.2...3.2 [-]
f_c :	altitude factor 1500m=1.0...3000m=1.3

- Weight of the snow prism, formed by the supporting plane of the net and a imaginary plane perpendicular to the slope starting at the base of the net with a snow density of 300kg/m^3 :

$$G' = 3 \cdot A \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

A: area between net and plane $[\text{m}^2]$

The component of the snow pressure perpendicular to the slope is not considered for the dimensioning of snow nets. If the net is filled up with snow, the upper edge of the net leans on the ground and a part of the weight of the snow prism is transferred directly to the ground. It is assumed that the perpendicular component of the snow pressure equals this part of G' . The resultant snow pressure R' is distributed uniformly over the height of the net. For the design the slack of the net is chosen in such a way that the tangent to the net at the top of the support is perpendicular to the slope. The resultant snow pressure R' is divided into the direction of the tension forces $K1$ perpendicular to the slope and of $T1/3$. The forces $K1$ and $T1/3$ are in equilibrium with the resultant R' . With $K1$ the forces in the post and in the guy can be determined. For the design of the post an additional lateral snow pressure resulting from

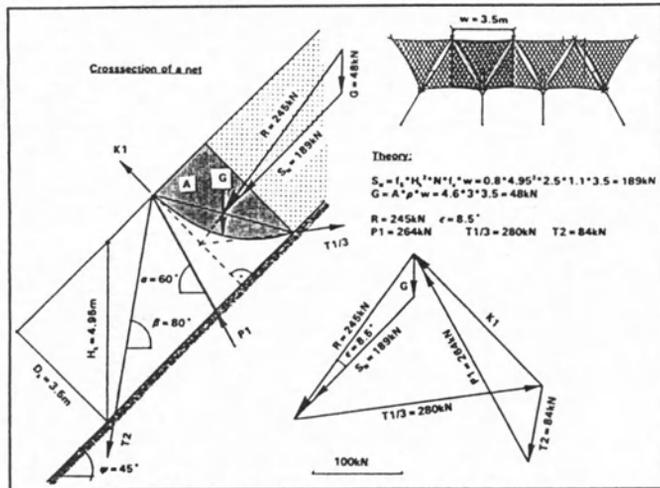


Fig.2: Crosssection of a net, plan with the distribution of forces

the direct contact of the snowpack with the post must be considered. $T1/3$ is equal to the tension force at the upper anchor. The wire ropes of the net and the fixations to the post and anchors are calculated with a 1.3 times higher specific snow pressure. The specific snow pressure is distributed uniformly over the height of the net and acting parallel to the resultant R' .

For a snow net system with the parameters (slope angle $\psi=45^\circ$, thickness of snow cover $D_k=3.5\text{m}$, snow gliding $N=2.5$, altitude factor $f_c=1.1$) and distance between the posts of 3.5m for a middle field without edge effects the design forces are listed below.

post P (pressure):	upper anchor K2 (tension):	lower anchor T (tension):
264kN	280kN	84kN.

DISCUSSION

Especially the tension forces at the upper anchor for the bigger net sizes are very big and an economic application is only possible in good bedrock. Further the choice of the tangent resp. of the shape of the net is decisive for the calculation. The larger the slack of the net, the smaller are the tension forces in the net. If the slack of the net diminishes from 20% to 10%, the tension force in the upper anchor increases by a factor 1.6. Normally snow nets are designed for a slack of 15%. The shape of a net is taken 2-dimensionally. In reality the net is curved in 3 dimensions. The distribution of the snow pressure is not known exactly. The lower the resultant snow pressure is situated the smaller the pressure force in the post. The design of snow net systems according to Haefeli is a rough theoretical approach which is not yet validated by field measurements.

EXPERIMENTAL METHOD

The goal of the research project is to measure the forces in snow net constructions and to check and improve the design method of Haefeli. Until winter 94/95 there were three snow net structures equipped with gauges in 2 sites which are controlled with supporting structures. The main criteria for the choice of the sites (Tab.1) have been the amount of snow, the accessibility in winter and summer, the easy of installation of the gauges and the evenness of the slope.

Site	Oberalp 1	Oberalp 2	Duchli
Region	central part of Switzerland		region of Davos
Type	Kabelwerke Brugg		Fatzer
Starting	90/91	92/93	94/95
height of structure	3.8m	3.8m	3.5m
net type	mesh size 250mm	mesh size 250mm	mesh size 250mm with 0.5m stripes of dense wire mesh
altitude above sea level	2200m	2200m	2200m
exposition	S	S	NE
slope angle	45°	36°	38°
terrain roughness	smooth, long bladed grass		surface covered with rhododendron and boulders 10...30cm
free slope distance above net	22m	12m	18m
gauges (load cells)	2 pressure, 4 tension load cells	1 pressure, 3 tension, 1 snow depth gauge	1 pressure, 3 tension load cells

Tab.1: Characteristics of the sites

DESCRIPTION OF THE MEASUREMENTS

The pressure forces are measured in 3 posts with vibrating wire strain gages of the types Geokon VSM-4000 and VW-4100. Per cross section 3 gages are welded at the steel surface. A thermistor is encapsulated inside the plucking coil assembly. The temperature compensation is achieved by matching the coefficient of expansion of the wire to that of the underlying steel. The sensitivity of the gages is 0.5...1 microstrain.

The tension forces at the anchors and the pressure force in one post are measured with calibrated electrical load cells of the type Burster 85081 "RM". The tension load cells are installed directly between anchor and cable with links. The load cells have a range at the lower anchor from 0...100kN and at the upper anchor from 0...200kN. The sensitivity is about 1% of the full scale capacity. The forces in the cables of the nets are not measured.

Data loggers (Campbell CR10) are programmed to take automatic readings of the gauges and store the measured data every two hours during all the winter. At the beginning and end of every winter the offset values of the gauges are measured. The dataloggers are fixed at the posts in waterproof cases. During field visits the data are checked and secured.

Because of the flexibility of the nets and the different slack in summer and winter the fixation of the electrical cables is a big problem. The creeping snow destroyed electrical cables four times. The best solution would be to install all gauges if possible in the snow free places of the construction.

During field visits the snow distribution and snow depth, the density and the geometry of the construction (inclination of post, net and guys, slack) are measured from one to four times a winter.

RESULTS

The following tables 2 and 3 collect the data which have been measured during the winters 1990/91 until 1994/95:

Date		T1 (kN)	T2 (kN)	T3 (kN)	T4 (kN)	P1 (kN)	P2 (kN)	ρ (kg/m ³)	HS (m)	α (°)	β (°)
21.1.92	visit	38	8	31	-	-	49	318	1.8	59	82
25.2.92	visit	51	16	42	-	-	66	361	2.3	60	81
8.4.92	Max.	-	21	48	-	-	71	-	-	-	-
9.4.92	visit	-	18	47	-	-	68	400	2.8	60	83
3.3.94	Max.	53	20	58	31	75	68	-	ca.2.2	-	-
10.3.94	visit	30	12	44	20	40	41	389	2.0	61	83
1.3.95	visit	39	15	50	26	71	64	378	2.3	60	82
2.4.95	Max.	50	22	66	31	89	80	-	ca.3.1	-	-
19.4.95	visit	44	-	45	22	61	50	438	2.8	60	83

Tab.2: Data of the winters 1991/92 until 1994/95 of net 1 of the Oberalp site

Date		T1 (kN)	T2 (kN)	T3 (kN)	P1 (kN)	ρ (kg/m ³)	HS (m)	α (°)	β (°)
2.3.93	visit	9	7	10	15	288	2.0	69	75
16.4.93	Max.	13	12	17	27	-	2.0	-	-
19.4.93	visit	13	12	16	24	407	2.0	72	76
7.3.94	Max.	22	16	27	41	-	2.0	-	-
10.3.94	visit	17	12	21	31	389	1.9	69	75
1.3.95	visit	44	27	53	67	378	2.5	70	73
3.4.95	Max.	70	ca.39	74	95	-	3.5	-	-
19.4.95	visit	56	26	63	78	438	3.3	71	73

Tab. 3: Data of the winters 1992/93 until 1994/95 of net 2 of the Oberalp site

The maximal forces have been recorded in winter 94/95: tension at the upper anchors of 70 and 74kN, at the lower anchor about 39kN and pressure in the post of 95kN. The snow height was 3.5m. The net was filled up to 70% of the design snow depth. Until today the equipped nets have not been filled up completely with snow. Figures 3 and 4 present diagrams of the snow pressure measured during all the winter. The maximal snow pressure occurred normally between begin of March and middle of April.

The short-time variations of the measured forces are very interesting (fig.5). From 8.3.94 to 10.3.94 the measured forces diminished by more than 50%. Within this time the mean day temperature of the air increased from 1°C to 3.6°C and the snow depth diminished from 200cm to 178cm. During the following days the daily variation of the measured forces were up to 60%. The maximal forces were measured at 8⁰⁰ hours and the minimal forces between 16⁰⁰ and 18⁰⁰ hours. This corresponds to the temperature change of the steel post. The solar radiation seems to have a bigger influence than the air temperature. A reason for this effect could be that the melting rate around the warmed up construction is bigger than the creeping and gliding velocity of the inclined snowpack. During time periods with cold temperatures the forces are bigger and the daily variations of the forces are not so obvious.

If the net is filled up with snow the upper edge of the net is lying on the ground. The shape of

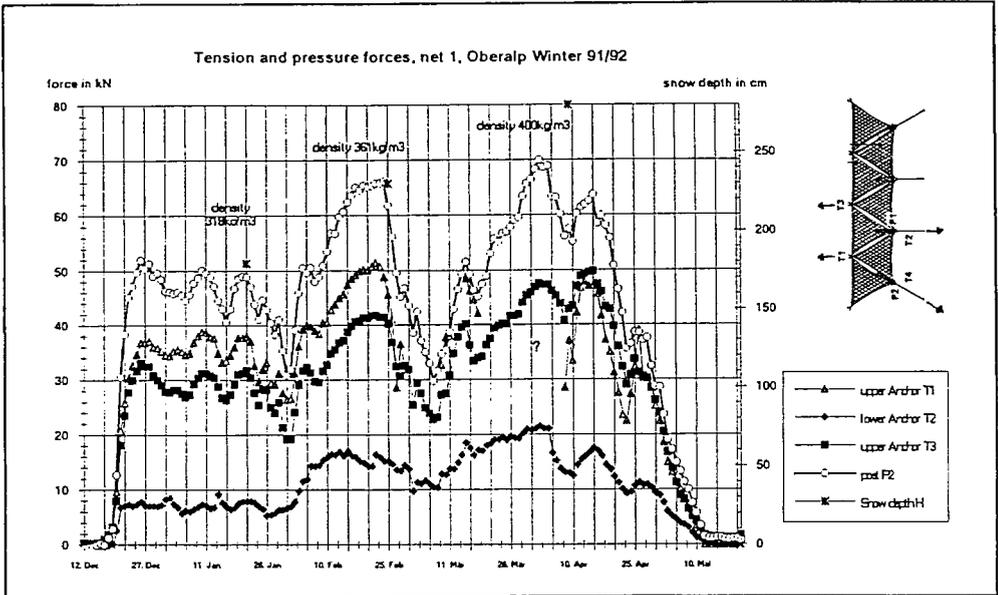


Fig.3: Tension and pressure forces, net 1, Oberalp, winter 91/92

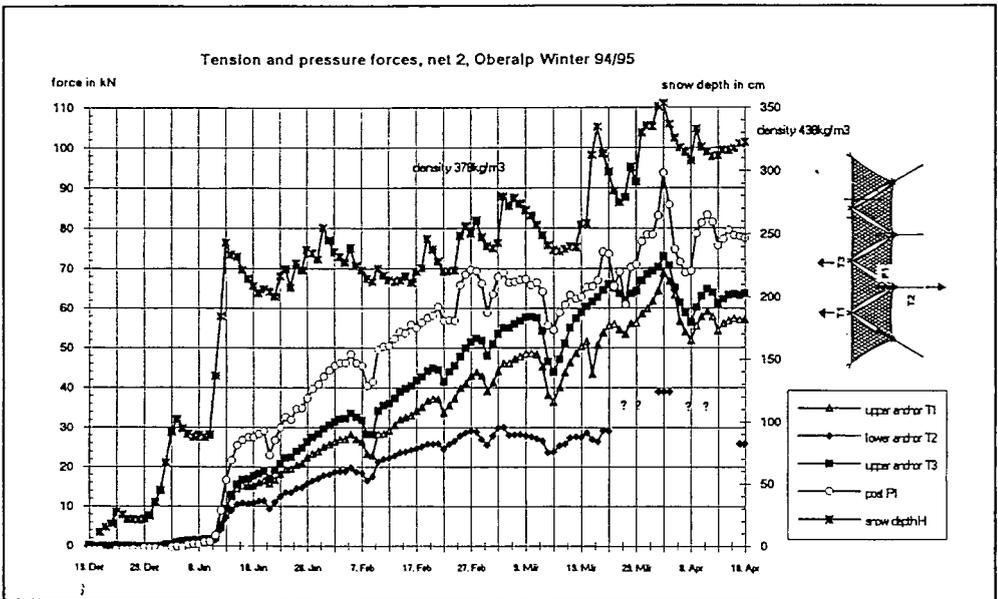


Fig.4: Tension and pressure forces, net 2, Oberalp, winter 94/95

the net is more like a bag than like a parabola. Under the net there is normally a snow tunnel. Most of the weight of the snow seems to be carried by the net and not transferred to the ground. The snow crept up to 50cm through the mesh ropes of the net. The snow consistence was like ice at these locations. At the nets which were covered with smaller meshes the creeping through

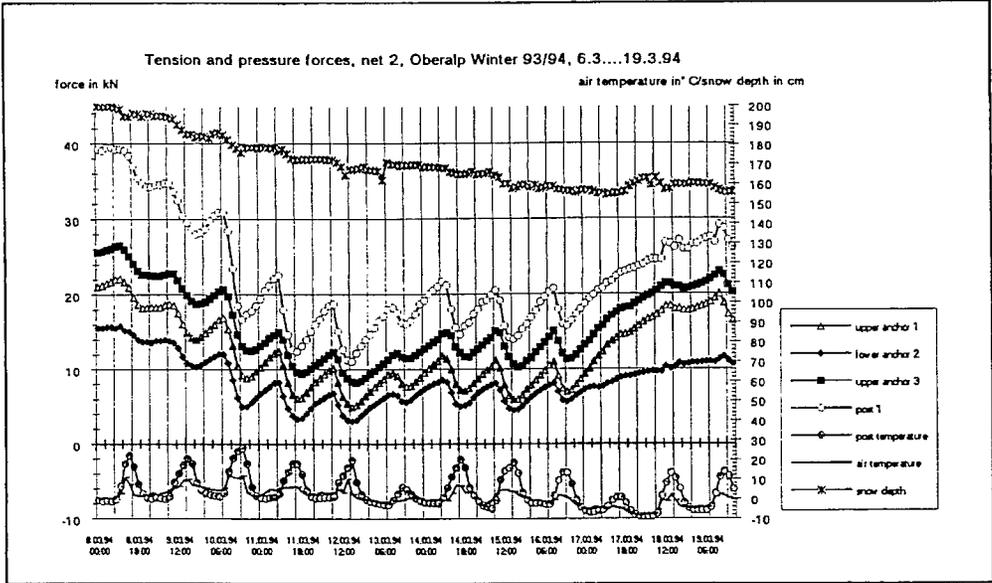


Fig.5: Tension and pressure forces, net 2, Oberalp, 6.3...19.3.94

the net was smaller than at the nets without cover.

During the winter the inclination of the post increases (up to 7°) and the inclination of the guy gets smaller: the post tips upward. The measured forces in the posts are generally bigger than the upper anchor forces. With the forces and inclinations of the post and guys we can determine the tension force K_1 . K_1 varies to the perpendicular line to the ground in the range of $\pm 5^\circ$. According to Haefeli, K_1 should be perpendicular to the ground.

In figure 6 a backcalculation is made for the situation of 2.4.1995 at the net 1 (Oberalp). With the polygon of forces the resultant snow pressure R' is determined to 79kN and the angle between the resultant and the direction parallel to the slope ϵ_R to 41.5°. With the parameters of the Swiss guidelines and a distance between the posts of 3.5m R' is 96kN and ϵ_R is 11.5°. The resultant in the experiment is much steeper than according

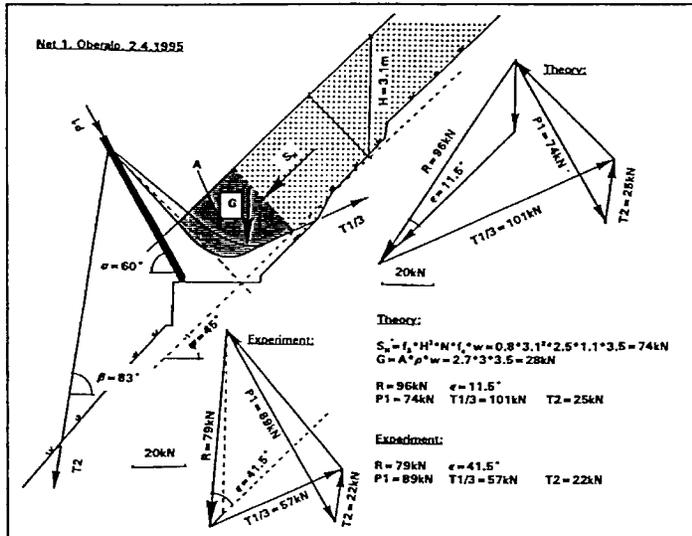


Fig.6: Backcalculation net 1, Oberalp, 2.4.1995

to the theory. The consequences are that the theoretical upper anchor force is about 1.8 times bigger and the force in the post 1.2 times smaller than measured. Perhaps the influence of the dead weight of the snow prism is bigger because of the "bag" figure of the net and the higher snow density. Another reason can be that there is also a component of the snow pressure perpendicular to the slope S_Q because the settlement of the snowpack is prevented by the roughness of the net. S_Q is negligible according to the guidelines. Further the lateral forces on the guy are not considered in the calculations.

The experimental data could be improved by measuring the displacement of the snow cover with glide shoes and the angular displacements at the upper tension load cells, the post and the guy with electrical inclinometers. To measure the shape of the net in detail without disturbing the snow cover is nearly impossible.

CONCLUSIONS

The measurements of the forces in snow net constructions carried out since winter 1990/91 on different slopes have yielded some useful informations. The most important results are as follows:

- The angle between the resultant snow pressure and the direction parallel to the ground is much larger than according to the guidelines. The snow pressure perpendicular to ground seems to be larger than the respective component of the weight of the snow prism.
- The pressure force in the post is usually bigger than the upper tension force. According to the theory of Haefeli the tension force in the upper anchor is overestimated and the pressure force in the post is underestimated. The direction of the tension force K_1 at the top of the net varies to the perpendicular line to the ground in the range of $\pm 5^\circ$. According to Haefeli, K_1 should be perpendicular to the ground.
- With a cover the snow creeping through the net gets smaller. That means the reduction factor should be adapted to the mesh width of the net.

REFERENCES

BUWAL/WSL, 1990 - *Richtlinien für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet*, Bern, 76p.

Haefeli (R.), 1954 - *Vorschläge zur Konstruktion und Berechnung von Netzwerken*, Externer Bericht Nr.2112 SLF, 23p.

Kern (F.), 1978 - *Calcul des efforts dans les filets paravalanches, compte rendu du deuxième rencontre internationale sur la neige et les avalanches, ANENA*, Grenoble, pp.241-250

Dynamique des avalanches

Présentation du site expérimental du Col du Lautaret (Hautes-Alpes)

F. Ousset, O. Marco, J.-M. Taillandier¹

RESUME

Le site expérimental du Col du Lautaret est utilisé depuis 1972 dans le cadre de l'étude de la dynamique des avalanches. Equipé à l'origine par la division Nivologie du CTGREF (devenu Cemagref) avec la collaboration du Laboratoire d'Applications Spéciales du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble (CENG) et du Centre d'Etude de la Neige, il a permis la réalisation de nombreuses campagnes de mesures afin de tester divers types de capteurs et de valider des modèles numériques d'écoulement d'avalanches.

ABSTRACT

The experimental site of the Col du Lautaret has been used since 1972 to study the dynamics of the avalanches. It had been equipped at the origin by the Division Nivologie of the CTGREF (became Cemagref) in a cooperation with the Laboratoire d'Applications Spéciales of the Centre d'Etudes Nucléaires of Grenoble (CENG) and the Centre d'Etude de la Neige from Météo-France. The site gave the opportunity to realise many measurements to test different types of sensors and validate numerical models of avalanche flow.

INTRODUCTION

Pourquoi un site expérimental ?

L'étude de la dynamique des avalanches est indispensable afin d'améliorer la protection des personnes et des biens. En France, on dénombre chaque année une trentaine de victimes et d'importants dégâts matériels (destruction de bâtiments, de routes, de remontées mécaniques, etc....).

La décision d'instrumenter un site a pour but de mesurer les paramètres physiques liés aux écoulements avalancheux, et ainsi de mieux comprendre la physique de ces phénomènes.

Le site expérimental du Col du Lautaret est consacré tout d'abord au développement de nouvelles méthodes de mesures de ces paramètres, mais également, en association avec des constructeurs, à la réalisation de campagnes d'essais pour de nouvelles technologies ayant trait au déclenchement des avalanches.

Situation géographique du site expérimental :

Il est situé entre le Col du Lautaret et le Col du Galibier. Grâce à la route nationale franchissant ce col et assurant la liaison entre Grenoble et Briançon, ce site expérimental est pratiquement accessible par tous les temps.

Description du site :

La face sud-est de la crête de Chaillol est sillonnée par sept couloirs rectilignes et très prononcés, sujets à de nombreux écoulements avalancheux. Les altitudes de départ des avalanches sont comprises entre 2300 et 2600m et les zones d'arrêt se trouvent vers 2100m (voir figure n°1)

¹ Cemagref, Division Nivologie, 2, rue de la Papeterie, 38402 ST MARTIN D'HERES,
Tel : 76.76.27.27, Fax : 76.51.38.03.

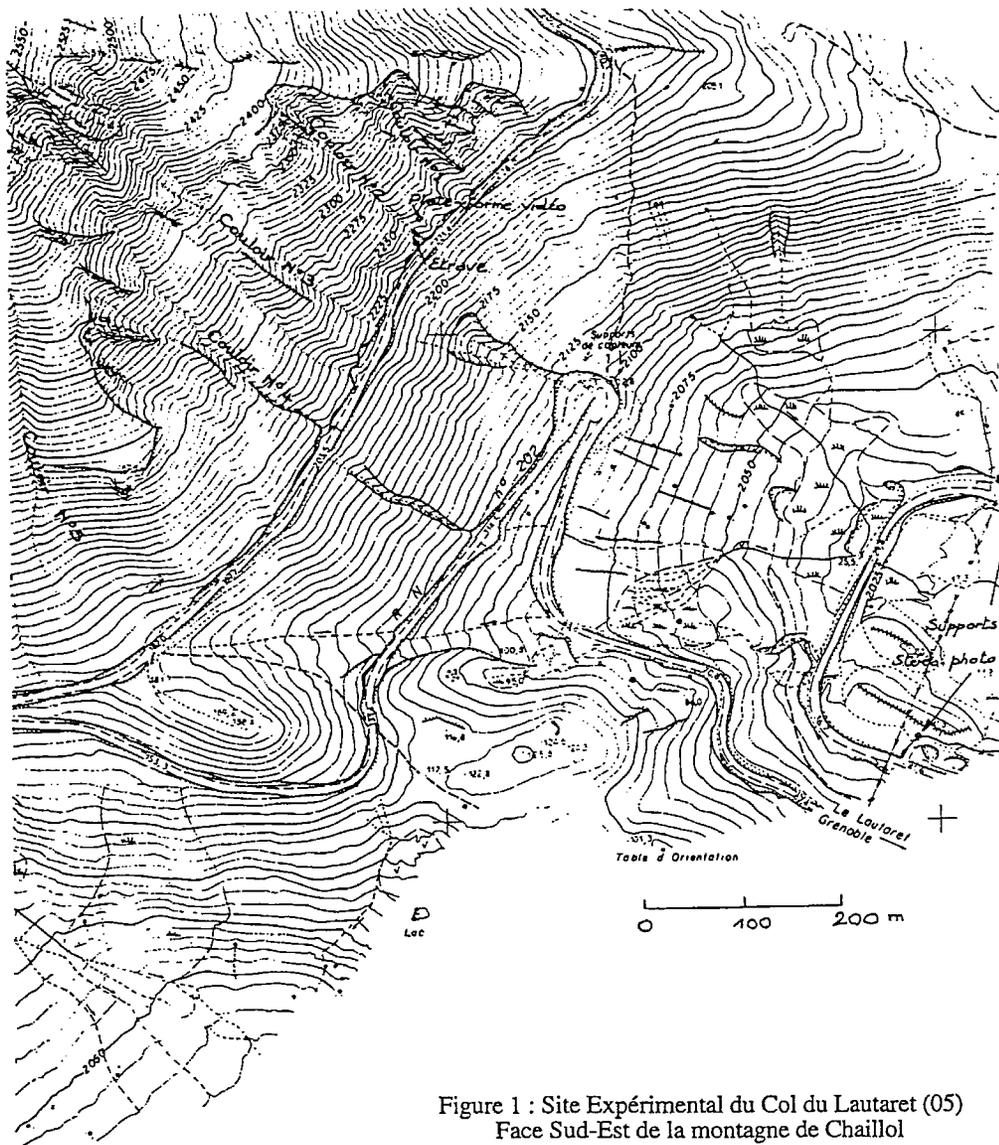


Figure 1 : Site Expérimental du Col du Lautaret (05)
Face Sud-Est de la montagne de Chaillol

1 HISTORIQUE

Depuis 1972, la Division Nivologie réalise des mesures d'avalanches in situ. Les premières expériences sont réalisées à Poutran, sur le domaine skiable de l'Alpe d'Huez. Cependant, l'enneigement déficitaire de l'hiver 1972-73 ne permet pas la poursuite des essais et le choix s'arrête alors sur les pentes sud-est de la Montagne de Chaillol située entre le Col du Lautaret et le Col du Galibier. Dès lors, et ce jusqu'en 1981, la Division Nivologie collabore avec le Laboratoire d'Applications Spéciales de la Physique du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble et le Centre d'Etude de la Neige. Plusieurs mesures sont alors effectuées au sein de l'écoulement : mesures de pression, de densité et de vitesse (LAUTARET, 1973-81).

La stéréophotogrammétrie a permis de mesurer la vitesse et la hauteur du front de l'avalanche durant la période 1978-81. Ce principe est ensuite utilisé lors des campagnes de mesures des hivers 1982-83 et 1983-84 au Col d'Ornon (Isère) pour l'étude des avalanches aérosols. Les mesures réalisées ont été utilisées pour vérifier les modèles numériques (Marco, 1986). De 1985 à 1989, les efforts de la Division se concentrent sur le développement des modèles numériques des avalanches denses. Depuis 1990, la Division tente de revenir aux expériences de terrain afin de mieux comprendre ces phénomènes et valider ces modèles.

2 EQUIPEMENT DU SITE EXPERIMENTAL

2.1 Infrastructure

Ce site expérimental possède une infrastructure destinée à recevoir différents types de capteurs. Concernant la stéréophotogrammétrie, deux poteaux supports espacés d'une centaine de mètres ont été installés et peuvent chacun recevoir un appareil photographique de type "Hasselblatt" 6x6. Quatre des sept couloirs peuvent être observés de ces emplacements. Ils sont équipés de balises fixes situées dans la zone de départ permettant la restitution photogramétrique (cf. figure n°1).

Le principe de cette technique est de prendre simultanément deux photographies de l'avalanche à partir de deux positions différentes, à intervalle de temps régulier. L'étude des couples de clichés permet de restituer l'écoulement en 3D. De nombreux paramètres peuvent ainsi être mesurés: la vitesse du front, le volume et la hauteur de l'avalanche (Gallois, 1977).

En 1990, l'infrastructure la plus importante et la plus délicate a été mise en place dans le couloir n°2. Il s'agit d'un support de capteurs en forme d'aile d'avion composé de deux demi-coques moulées en fibre de verre et résine polyester offrant une forme profilée afin de diminuer la traînée (photographie ci-contre).

Cette étrave, implantée au centre du couloir, doit résister à la poussée de la neige tout en perturbant le moins possible l'écoulement. Prévue pour recevoir plusieurs types de capteurs, elle a une hauteur de 4m50 et est fixée sur un tube acier ancré perpendiculairement à la pente dans un socle de béton d'un volume d'environ 10 m³. Sur chaque demi-coque apparaissent neuf bossages espacés de 0,5 m chacun ; ils permettent le montage des différents capteurs à tester. Un réseau de câbles électriques intégrés dans le corps de l'étrave relie chaque bossage à une armoire de commande ou à une centrale d'acquisition (Maatel, 1991).

Les objectifs s'orientent en 1992 sur une étude de faisabilité concernant la mesure de la vitesse à la surface de l'écoulement en utilisant les techniques du traitement d'images (Kohler, 1992). Le choix du matériel se porte alors sur l'acquisition d'une caméra vidéo CCD dont les images sont facilement traitées par informatique. Après avoir défini le positionnement précis de la caméra, une



Photographie 1
Equipement du support de capteur profilé (1992)

plate-forme est installée en rive gauche du couloir. L'étrave ainsi que des jalons placés en dehors du couloir serviront de repère pour le travail de restitution. Les images obtenues permettront également de mieux comprendre le phénomène, en particulier celui de la reprise de la neige et du front.

En 1994, une potence construite puis installée en rive gauche permet de réaliser des prises de vues au dessus de l'écoulement afin d'alléger les calculs de vitesses par les techniques d'imageries en évitant les problèmes liés à la géométrie optique (angle de prise de vue).

2.2 Techniques de mesures

Les techniques de mesures ponctuelles ou en continu de l'écoulement avalancheux utilisées depuis la mise en place de l'équipement ont été les suivantes :

- Mesures de la vitesse :
 - Moulinets Neyrflux hydrauliques (LAUTARET, 1973-81) (voir Photographie 2) ;
 - Stéréophotogrammétrie [Gallois, 1977], (CTGREF, 1980) (voir Figure 1) ;
 - Traitement d'images (Granada, Marco, Villemain, 1995) ;
 - Méthode acoustique appliquée en plusieurs points de l'écoulement ;
- Mesures de pression :
 - Capteurs à anneau de garde (LAUTARET, 1973-81) ;
- Mesures de densité :
 - Absorption de rayonnement Gamma (LAUTARET, 1973-81) ;
 - Piège à neige (voir photographie 3) ;
 - Méthode acoustique (Marco, 1995) ;

Les mesures acoustiques ont été réalisées en laboratoire en collaboration avec le Centre d'Etudes de la Neige de Météo France et le Laboratoire d'Instrumentation de Microinformatique et d'Electronique de Grenoble (Marco, Touvier, 1994). Les résultats de plusieurs essais ont permis de montrer la possibilité de déterminer la densité de la neige à partir de ses propriétés acoustiques. Le développement d'un capteur permettant de réaliser des mesures avec une neige en mouvement demandera une mise au point technologique importante.

Toutes ces expériences de terrain menées de 1972 à 1995 ont ainsi permis d'effectuer différentes mesures des paramètres physiques caractérisant l'écoulement avalancheux.

3 PERSPECTIVES

Le 14 mars 1995, l'ensemble des installations a malheureusement été détruit par une avalanche. Suite à cet événement, la Division Nivologie souhaite remettre en état le site. Les principaux investissements seront :

- la mise en place d'un nouveau support de capteurs de taille plus faible, afin de limiter la poussée de l'écoulement et de diminuer au maximum les perturbations dues au sillage. Ce support sera composé simplement d'un pylône avec jambe de force qui sera fixé sur le socle en béton ;
- d'une petite étrave métallique soudée sur le mât en amont face à l'écoulement qui recevra les différents capteurs ;
- des travaux de génie civil : la construction d'une étrave béton, à l'amont de l'éperon rocheux, ayant pour fonction de protéger la plate-forme et la caméra vidéo. La construction d'un abri en béton armé, sous l'éperon rocheux, assurera la sécurité des personnes lors des opérations de déclenchement artificiel.

Concernant les diverses mesures à réaliser, un capteur de pression utilisant le Polyvinyle Di Fluoré (PVDF) est actuellement en cours de développement en collaboration avec le LIME, pour étudier la répartition hydrostatique (ou non) de la pression au sein de l'écoulement. De même, le Centre d'Etude de la Neige effectuera des mesures pour l'étude de la signature sismique de l'écoulement avalancheux.

Le site Expérimental du Lautaret deviendra, dans le cadre d'un programme de recherche européen, le site atelier ayant pour objectif de tester et développer des prototypes qui seront, à terme, utilisés sur un site européen unique.

← Photographie 2 (1978)

Support placé dans le couloir 2 avec :
- 3 moulinets hydrauliques Neyrflux
- 2 capteurs de pression à anneau de garde



Photographie 3 (1992) →

Après le passage de l'avalanche :
Piège à neige rempli, destiné à mesurer la densité
de la neige en mouvement.
La fermeture du piège est commandée à distance.



CONCLUSION

Les expériences in situ restent à ce jour indispensables dans le cadre de la dynamique des avalanches. Les résultats issus des mesures de terrain sont en effet nécessaires afin de caler les modèles numériques développés.

Cependant, la réalisation de ces expériences est très lourde puisqu'elle demande d'une part des implications administratives draconiennes imposées par une réglementation de sécurité très stricte

(PIDA) et d'autre part la présence d'une équipe de terrain formée de personnes aux fonctions complémentaires afin de mener au mieux le bon déroulement de ces expériences. Enfin, toute cette infrastructure nécessite des moyens financiers importants que seul le Cemagref ne pourrait apporter. C'est pourquoi, grâce au soutien du Pôle Grenoblois d'Etudes et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels, aux contrats Etat-Région et aux contrats européens, la Division Nivologie tentera d'assurer la poursuite de ces campagnes de mesures.

BIBLIOGRAPHIE

- CTGREF, 1980 - La stéréophotogrammétrie à cadence rapide d'avalanches, *Informations techniques, cahier 39*
- LAUTARET, 1973-81
- Alléra (J.-L.), Amardeil (P.), Arnaud (H.) et al., 1973 - Programme Dynaneige 1972-1973 Compte rendu d'activité, *note CENG/ASP n° 73-12*.
- Barret (L.), Eybert-Bérard (A.) et Rey (L.), 1981 - Dynamiques des avalanches. Saison de neige 1979-1980, *Note CENG/ASP n° 81-01*.
- Bon Mardion (G.), Coche (G.), Eybert-Bérard (A.) et al., 1974 - Mesures dynamiques dans les avalanches. Premiers résultats expérimentaux, *Note CENG/ASP n° 74-01*.
- Bon Mardion (G.) et Meunier (J.), 1974 - Etude préliminaire du fonctionnement d'un capteur de pression à empreinte pour avalanches, *Note CENG/ASP n° 74-08*.
- Bon Mardion (G.), Eybert-Bérard (A.), Guelff (C.) et al. 1975 - Mesures dynamiques dans les avalanches, résultats expérimentaux de la saison de neige 1973-1974, *Note CENG/ASP n° 75-01*.
- Bon Mardion (G.), Eybert-Bérard (A.), Guelff (C.) et al., 1976 - La dynamique des avalanches d'après les résultats des expériences de déclenchement artificiel au Lautaret, *Note CENG/ASP n° 76-03*.
- CTGREF, 1978 - Présentation des expériences et nouvelles perspectives en dynamique des avalanches, *Rapport interne de la Division Nivologie*.
- Dupré La Tour, 1978 - La dynamique des avalanches d'après les expériences du col du Lautaret, *CENG/ASP Rapport de stage*.
- Eybert-Bérard (A.), Brugnot (G.) et Rey (L.) 1978 - Mesures dynamiques dans l'avalanche. Résultats expérimentaux du Col du Lautaret (1972-1978), *Comptes Rendus de la Deuxième Rencontre Internationale sur la Neige et les Avalanches 12-13- 14 avril 1978*, pp 203-224.
- Eybert-Bérard (A.), Mura (R.), Rey (L.) et al., 1977 - La dynamique des avalanches : Résultats expérimentaux du Col du Lautaret . Année 1976, *Note CENG/ASP n° 77-03* .
- Eybert-Bérard (A.), 1980 - Dynamique des avalanches : Saison de neige 1978-1979 , Col du Lautaret - *Note CENG/ASP n° 80-01*.
- Foucou (J.), 1981 - Dynamique des avalanches : Saison de neige 1980-1981, Col du Lautaret, *Note CENG/ASP n° 80-01*.
- Gallois (E.), 1977 - Stéréophotogrammétrie de l'avalanche, *rapport de stage CTGREF*.
- Granada (F.), Marco (O.) et Villemain (P.), 1994 - Utilisation des techniques d'imagerie pour la cartographie des vitesses à la surface d'une avalanche dense, *Colloque de Glaciologie et de Nivologie de la Société Hydrotechnique de France 10 - 11 mars 1994*.
- Kohler (P.), 1992 - Utilisation du traitement d'images pour la mesure de vitesse à la surface d'un écoulement avalancheux, *Rapport de fin de stage de maîtrise ès Sciences Thermiques & Energétique Université de Franche-Comté - Division Nivologie du CEMAGREF*.
- Maatel, 1991 - Etude d'une centrale d'acquisition automatique en environnement difficile, *Rapport non publié disponible à la division Nivologie du CEMAGREF*
- Marco (O.), 1986 - Dynamique des avalanches de neige dense : Interprétation de résultats expérimentaux, *rapport de DEA , CEMAGREF / ENSEEIH*
- Marco (O.), 1995 - Instrumentation d'un site avalancheux : De l'utilisation des propriétés acoustiques de la neige et des techniques d'imagerie pour la mesure de paramètres physiques d'une avalanche dense, *Collection Etudes du Cemagref, Département de L'Equipement pour l'Eau et L'Environnement, n° 16*.
- Marco (O.), Touvier (F.), 1994 - Les propriétés acoustiques de la neige : Application à la mesure de la densité. *Colloque de Glaciologie et de Nivologie de la Société Hydrotechnique de France 10 - 11 mars 1994*.

Ancrages par pieux explosés : améliorations techniques

P. Bouvet¹, G. Mazzoleni², F. Rapin³

RESUME

Des essais de convenance de pieux explosés, réalisés avant un chantier de paravalanches, ont montré que l'arrachement se produisait pour des forces variant de 100 à 250 kN (alors que la force limite d'arrachement escomptée était de 250 kN). L'extraction des bulbes a montré qu'ils étaient, pour la plupart, soit fissurés soit brisés et que la profondeur d'ancrage ou la qualité du sol n'étaient pas les facteurs les plus importants pour expliquer ces mauvais résultats. De nouveaux essais ont alors été réalisés pour améliorer la technologie des ancrages. Il en ressort aujourd'hui (alors que de nouveaux essais de convenance restent à réaliser) qu'il faut veiller à utiliser des barres métalliques (et non pas des câbles), et des mortiers de scellement de qualité (retrait compensé et résistance élevée à la compression) et à réaliser un rainurage soigné du tube extérieur, sur 40 cm de long (pour obtenir, après explosion, des "lanières" métalliques solides et une longueur importante de scellement de la barre dans le bulbe).

ABSTRACT

Pulling tests on exploded piles were carried out prior to the putting up of a series of avalanche snow nets. The results showed that the piles yielded at tensions between 100 and 250 kN, while we had hoped that they would resist up to 250 kN. The extraction of the bulbs at the extremity of the piles revealed that they were either cracked or broken. But these bad results didn't seem related to the depth of the anchorage or the quality of the soil. New essays were then undertaken to improve the system, and it seems at the present time that it is preferable to use metallic bars (instead of cables) inside the piles and high quality cement. Superficial grooves should also be made on the outersurface of the tube, on a length of 40 cm, so as to obtain, prior to the explosion, a good sealing of the bar and the metallic strips in the the cement bulb.

¹Service R.T.M. - 6, Avenue de France, 74000 Annecy

²CETE Groupe de Mécanique des Roches -109, Avenue S. Allende, 69674 Bron Cedex

³CEMAGREF Nivologie - BP 76, 38402 St Martin d'Heres Cedex

LES PIEUX EXPLOSES - PRINCIPES

La technique des pieux explosés a été développée il y a une vingtaine d'années au CEMAGREF Nivologie, pour permettre la réalisation d'ancrages en sols meubles avec un matériel facilement utilisable sur fortes pentes [D. HEDE et CTGREF - 1977].

Un tube métallique de \varnothing 49 mm, formé en pointe à une extrémité, est affaibli par quatre rainures de 30 à 40 cm réalisées au-dessus de la pointe. Après foration sur au moins 2 m, ce tube est enfoncé dans le sol et une charge explosive (en général 100 g) est positionnée à l'intérieur, au niveau des rainures. Après bourrage à l'eau, l'explosion provoque un éclatement localisé du tube et un camouflet en profondeur. Ce camouflet est rempli de coulis de ciment ou de mortier, par injection dans le tube. Un câble ou une barre métallique est ensuite mise en place au centre du tube pour transmettre les efforts de traction.

Cette technique est aujourd'hui communément employée pour l'installation de filets paravalanches ou pare-blocs.

De nombreux essais ont été réalisés sur ce type d'ancrages :

- * essais de contrôle sur chantier,
- * campagne d'essais, notamment pour tenter d'établir une relation entre la capacité des ancres et la nature du sol [HEIMGARTNER - 1981, LAMOUR - 1991].

Ces essais montrent que, pour des profondeurs de 2 à 3 m, presque tous les ancres résistent au moins à 10 tonnes et généralement à 15 ou 20 tonnes.

ESSAIS DE CONVENANCE A CHAMONIX (LE TOUR) : DES RESULTATS DECEVANTS ET UNE TECHNOLOGIE A AMELIORER

Préalablement à un important chantier de paravalanches, une campagne d'essais de convenance a été réalisée pour, d'une part, s'assurer de l'adéquation entre la technologie employée et la force de traction de service souhaitée, et, d'autre part, déterminer la profondeur minimale des ancres à respecter sur le site.

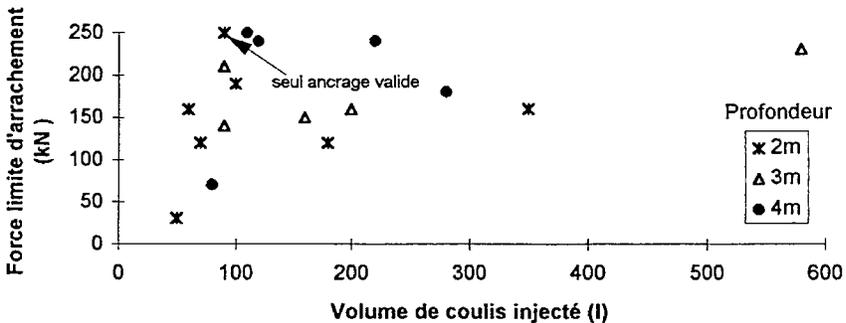


Figure 1

* tube \varnothing 48,3 mm - épaisseur 2,9 mm
affaiblissement par 4 méplats de 30 cm de long

* ancrage par câble à âme métallique \varnothing 28 mm

* modalités testées : profondeurs de 2, 3 et 4 m

* nombre total d'ancrages testés : 15 ($\frac{1}{3}$ à 2 m, $\frac{1}{3}$ à 3 m, $\frac{1}{3}$ à 4 m)

* scellement par coulis de ciment
CPA 55 dosé à 19 l d'eau/50 kg

* charge d'explosif : 100 g

* force limite d'arrachement : 250 kN

Le sol, constitué de matériaux à dominante argileuse issus de l'altération d'un substratum schisteux et d'apports morainiques, apparaissait a priori peu propice à ce type d'ancrages. Ces essais se sont déroulés en juillet 1994. Ils ont respecté, sans problèmes particuliers, la nouvelle norme française NF P 95-301 - *Ancrages passifs ponctuels en sol meuble - Méthode d'essais d'arrachement*.

La plupart du temps, la force limite d'arrachement était atteinte juste avant un claquement sec signifiant une rupture au niveau de l'ancrage lui-même (et non pas au niveau de la liaison ancrage/sol).

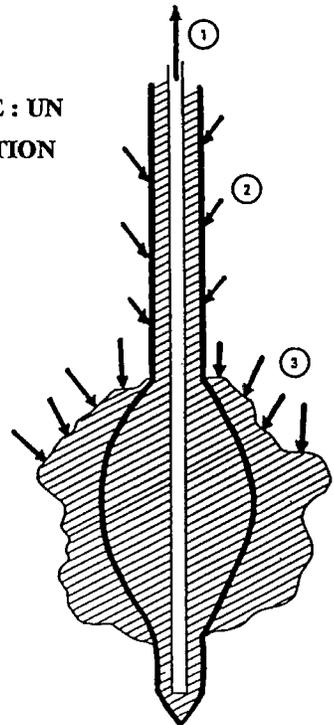
Par ailleurs, la force limite d'arrachement atteinte (entre 100 et 250 kN) étant loin de celle escomptée (\geq 250 kN), il a été décidé d'extraire les bulbes pour les examiner. De cet examen il est ressorti que :

- un seul bulbe est resté intact,
- tous les autres bulbes sont soit très fissurés, soit cassés, soit restés en profondeur (le câble étant sorti du bulbe)
- la forme des bulbes extraits est satisfaisante (ovoïde à cylindrique).

Ni la nature du sol ni la profondeur des ancrages ne suffisant à expliquer ces mauvais résultats et les bulbes n'ayant pas résisté aux efforts exercés, il fallait donc d'abord chercher à améliorer la technologie du système d'ancrage.

ANALYSE DU FONCTIONNEMENT D'UN PIEU EXPLOSE : UN BULBE SOUMIS A D'IMPORTANTES EFFORTS DE TRACTION

Figure 2
Schématisation de l'équilibre du système
1 - Force d'arrachement
2 - Forces de frottement du sol sur le tube
3 - Forces de réaction du sol en butée



Cet équilibre peut se décomposer en :

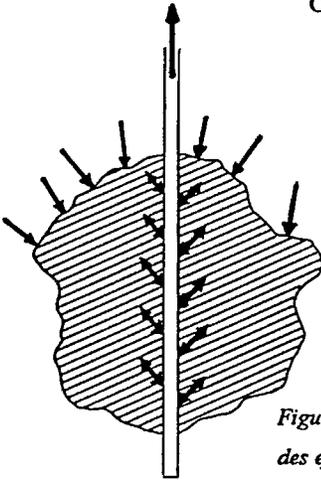


Figure 3
des efforts de traction
dans le bulbe

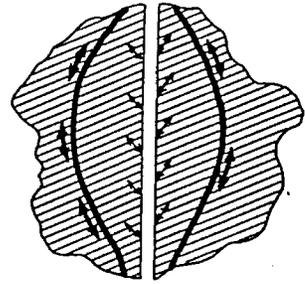


Figure 4
des efforts de traction dans les "lanières"
d'acier (ferrailage du bulbe)

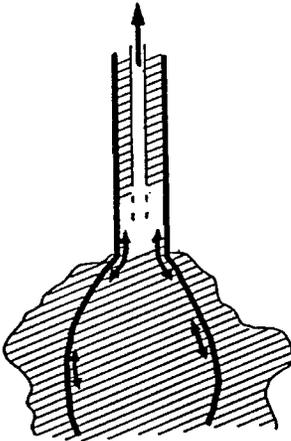


Figure 5
des efforts de traction dans les "lanières" d'acier
ancrées dans le bulbe
(transmises par la partie supérieure du tube)

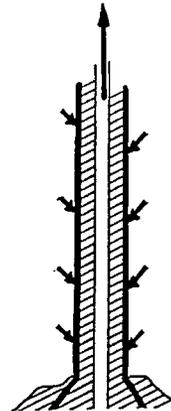


Figure 6
des forces de frottement
du sol sur le tube

Il est probable que la plupart des efforts sont repris selon le mode de fonctionnement décrit par la figure 3. Il est alors très important que le bulbe résiste aux efforts de traction (et le fait que les bulbes aient été cassés ou très fissurés dans nos essais, attesterait d'un dépassement des efforts de traction admissibles). On peut d'ailleurs comparer la longueur de scellement du câble dans le bulbe (environ **30 cm** dans nos essais) à la longueur de scellement droit l_s définie par les règles de calcul en béton armé :

$$l_s \text{ est de l'ordre de } \frac{125}{1+0,1f_{\sigma}} \varnothing \quad (\text{pour des barres d'acier haute adhérence Fe E 400})$$

soit pour une barre de $\varnothing = 28 \text{ mm}$

avec $f_{cj} = 60 \text{ MPa}$ $l_s \approx \underline{0,5 \text{ m}}$

avec $f_{cj} = 25 \text{ MPa}$ $l_s \approx \underline{1 \text{ m}}$

(il est probable que le coulis de ciment CPA 55, utilisé dans nos essais, n'atteint pas la résistance de 25 MPa)

Par ailleurs

- l'utilisation de câbles pourrait limiter l'adhérence au bulbe (par réduction, légère, de la section du câble lors de la mise en tension),
- l'utilisation de ciments avec lesquels les phénomènes de retrait sont importants pourrait limiter la résistance du système (notamment par apparition de fissurations dues au retrait pendant la prise).

De nouveaux essais ont donc été réalisés sur la résistance du bulbe et l'adhérence du câble ou de la barre.

ESSAIS SUR BULBES :

Des barres ou des câbles ont été scellés dans des cylindres de mortier et des efforts de traction ont été réalisés sur ces systèmes.

Barres : Gewi $\varnothing 28 \text{ mm}$

Câbles : acier $\varnothing 22 \text{ mm}$ (non dégraissés)

Mortiers * Lanko 702

résistance à la compression = 80 MPa

* Technia A 953

résistance à la compression = 40 MPa

Cylindres : diamètres 200, 300 et 400 mm

hauteur (= longueur de scellement) : 300 et 400 mm

longueur de scellement	CABLE $\varnothing 22$		BARRE $\varnothing 28$	
	300 mm	400 mm	300 mm	400 mm
Cylindre $\varnothing 200$ Lanko	39 kN	54 kN	180 kN	210 kN
Cylindre $\varnothing 300$ Lanko	38 kN	53 kN	210 kN	240 kN
Cylindre $\varnothing 400$ Lanko	37 kN	47 kN	210 kN	300 kN
Cylindre $\varnothing 300$ Technia	35 kN	39 kN	100 kN	170 kN
Cylindre $\varnothing 400$ Technia			170 kN	170 kN
Observations	Glissement du câble dans le cylindre		Rupture du cylindre de mortier	

Il apparaît que :

- les câbles glissent dans les cylindres de mortier pour des efforts peu importants (au laboratoire, les câbles n'avaient pas été dégraissés, ce qui introduit un biais dans ces essais),
- le scellement des barres GEWI est beaucoup plus efficace que celui des câbles,
- selon les dimensions du bulbe et la qualité du mortier, les efforts admissibles varient de 100 à 300 kN,
- seul un échantillon résiste à l'effort de 250 kN (limite fixée dans les essais de convenance initiaux),
- pour que l'ensemble du pieu exposé résiste à 250 kN il est donc nécessaire qu'une partie des efforts soit aussi reprise par frottement le long du tube (que nous préférons négliger) et, surtout, par traction dans les « lanières » d'acier,
- lors de la préparation du tube, il faut donc veiller à préserver au mieux ces « lanières » créées par explosion (affaiblissement du tube à faire par rainurage et non pas par méplats tangentiels, trop larges).

EN CONCLUSION

Il reste à réaliser de nouveaux essais de convenance sur site pour valider les améliorations techniques envisagées (essais prévus en juillet 1995).

Dans l'état actuel des connaissances, les principales prescriptions techniques pour ces pieux exposés seraient :

- utilisation de barres GEWI \varnothing 28 (pas de câbles),
- utilisation de mortiers à retrait compensé et de résistance à la compression supérieure ou égale à 80 MPa,
- affaiblissement du tube sur 40 cm, par rainurage radial à la disceuse,
- centrage soigné de la charge au niveau des rainures,
- profondeur minimale de 3 m (pour une force limite d'arrachement de 250 kN).

Mai 1995

Références bibliographiques

- Hede (D) et CTGREF Nivologie, Novembre 1977 - Les ancrages en sols meubles, *Neige et avalanches, Revue de l'ANENA*, 15, pp.11-18
- Heimgartner (M), Mars 1981 - Ouvrages de stabilisation à ancrages exposés, *Conférence annuelle de la section Glaciologie de la Société Hydrotechnique de France*, 14 p.
- Lamour (I), Septembre 1991 - *Normalisation des essais d'ancrages en sol meuble et sur fortes pentes - Résultats d'essais et interprétation*, DEA Mécanique INPG Grenoble, 31 p.

Détection acoustique des avalanches

Site La Sionne-Anzère, Valais, Suisse

V. Chritin, M. Rossi¹

RÉSUMÉ

La connaissance de l'activité avalancheuse permet d'améliorer la prévision locale des risques d'avalanches. Actuellement, la seule méthode pratiquée est l'observation visuelle - impossible de nuit ou par mauvais temps. En vue de disposer dans le futur de systèmes opérationnels de mesure automatique de l'activité avalancheuse, les techniques de détection sismique et / ou acoustique sont envisagées. Pour évaluer la détection acoustique, un système expérimental a été installé sur le site de La Sionne afin d'enregistrer, durant tout l'hiver 94/95, les sons lors de déclenchements artificiels d'avalanches. L'expérience a permis de constater l'émission d'infrasons par les avalanches et démontré la possibilité d'utiliser ces signaux pour détecter et localiser automatiquement les avalanches se produisant dans un rayon de plusieurs kilomètres. Le système comportait quatre microphones identiques installés de manière permanente en extérieur - protégés par un dispositif spécialement mis au point - et reliés à une instrumentation de sorte à former un goniomètre acoustique. Un microphone extérieur supplémentaire - à très faible bruit - était utilisé exclusivement pour l'enregistrement des signatures acoustiques. L'article décrit les résultats de la 1ère campagne de mesures, les possibilités et limites de la méthode - localisation, portée, influence du vent -, et les perspectives d'évolution du système expérimental en un système opérationnel² - optimisation de la prise de son, reconnaissance automatique d'événements.

ABSTRACT

Improving local forecasting and warning systems requires the continuous real-time knowledge of avalanche activity. Automatic detection methods are necessary to overcome difficulties inherent to the practical state of the art human observation, which is conditioned by the presence of observers and has severe limitations due to weather, lack of visibility at night, masking reliefs, avalanche types, etc. Seismic and acoustic techniques are considered. To test the acoustic detection method, an experimental system was installed in-situ during 94/95 winter in order to record acoustic events during periods of artificial release of avalanches. The experimentation has shown that the movement of avalanches produces acoustic signals suitable for automatic detection and localisation over extended areas. The present experimental system consists of four outside weatherproofed microphones combined in such a way as to constitute an acoustic goniometer. An additional very low noise microphone - dedicated to the record of the acoustic signatures of avalanches - completes the instrumentation. The article describes the results of the first experimental campaign, the intrinsic limits of the method - range, wind effects - and the potential of the system² to evolve in an operational way - optimisation of sound detection, automatic identification of events.

1. INTRODUCTION

La connaissance de l'activité avalancheuse dans une région - fréquence des avalanches, type, ampleur, localisation - permet d'améliorer la prévision locale des risques d'avalanches (Bolognesi, 95). Actuellement, la seule méthode pratiquée est l'observation humaine, conditionnée par la présence d'observateurs attentifs (patrouilleurs) et sévèrement limitée par des problèmes de visibilité (mauvais temps, nuit). D'autre part, certaines avalanches ne laissent pratiquement aucune trace visible - en dépit de leur ampleur et de leur vitesse - et sont donc difficilement repérables après un épisode de mauvais temps.

¹ Laboratoire d'Électromagnétisme et d'Acoustique (LEMA), École Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse - tél. + 41 21 693 46 26 fax + 41 21 693 26 73 email chritin@lema.de.epfl.ch

² système ARFANG



Les techniques de détection automatique envisagées actuellement sont basées sur la captation et l'identification à distance de signaux physiques caractéristiques des avalanches (par exemple ondes sismiques, ondes acoustiques).

La détection acoustique repose sur l'hypothèse d'une émission sonore des avalanches - et en particulier d'une émission d'infrasons, dont la propriété est de se propager dans l'air sur des distances importantes.

2. DESCRIPTION DU SYSTÈME EXPÉRIMENTAL

Le système expérimental installé au Pas-de-Maimbré à Anzère, alt. 2360 m, était composé de cinq microphones extérieurs, reliés à une instrumentation abritée à proximité immédiate. Quatre d'entre eux étaient utilisés pour la localisation des avalanches par goniométrie (cf. §4). Le cinquième - à très faible bruit - a été employé pour la caractérisation des sons émis (cf. §3).

La disposition retenue pour les quatre microphones du goniomètre était la demi-croix de 50 m de côté, située dans un plan horizontal à quelques mètres au-dessus du manteau neigeux (mâts haubanés). Le microphone supplémentaire était posé au sol, enfoui dans le manteau neigeux. Chaque microphone était protégé par un système de bonnettes (cf. §6) mis au point pour répondre aux trois types d'exigences inhérentes à l'application: acoustiques, mécaniques et de maintenance. Le système a permis l'enregistrement d'un total de 151 avalanches déclenchées artificiellement durant l'hiver 94/95 sur le site.

3. ÉMISSION ACOUSTIQUE

Dans le but de déterminer l'existence et les caractéristiques de signatures acoustiques d'avalanches, 17 enregistrements obtenus au moyen du microphone à faible bruit ont été analysés; tous correspondent à des avalanches de neige récente ayant produit un aérosol. Ces 17 enregistrements ont été sélectionnés selon un critère de bonnes conditions de mesures (notamment vent faible); toutefois, dans la plupart des cas de nombreuses autres sources de bruit étaient présentes sur le site (hélicoptère, dameuse, remontées mécaniques). La majorité des avalanches traitées étaient inaudibles, bien que parfaitement visibles des personnes présentes. Dans 14 cas, les enregistrements révèlent une émergence nette d'infrasons (cf. fig.).

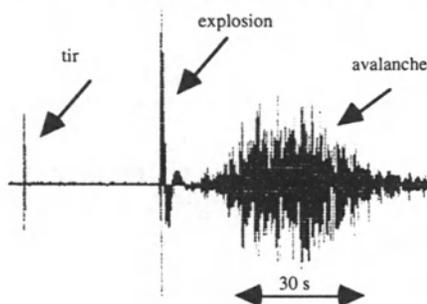


fig. 1: forme d'onde (1 - 100 Hz)

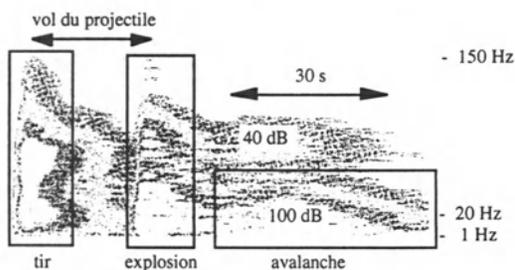


fig. 2: sonogramme

Globalement, l'émission acoustique des avalanches poudreuses - telle que captée par le système - se caractérise comme suit:

- gamme de fréquences de 1* - 8 Hz (avalanche lointaine) à 1* - 60 Hz (proche); la fréquence limite supérieure a été fixée arbitrairement à - 36 dB du niveau maximum mesuré dans la gamme
- intensité dans la bande 1 - 5 Hz: 65 à 100 dB *re* 20 μ Pa
- durée d'émission de 10 à 60 s.

* limitation de la chaîne de mesure

4. LOCALISATION

Le goniomètre a été utilisé pendant plusieurs périodes de déclenchement, indiquant automatiquement et en temps réel la direction - azimut, élévation* - de provenance des infrasons. Sur 38 avalanches traitées, toutes de type neige poudreuse, 22 ont été localisées correctement par le système (c.-à-d. que l'azimut trouvé était conforme à la localisation géographique de l'avalanche), tandis que pour les 16 autres le goniomètre ne détectait aucune source acoustique. Dans la plupart des 22 cas de localisation réussie, les valeurs d'élévation calculées par le système - si elles étaient effectivement comprise dans le secteur délimité par la dénivellation parcourue par l'avalanche - ne sont pas aisément interprétables (cf. fig. 4).

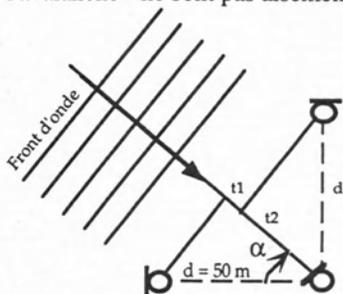
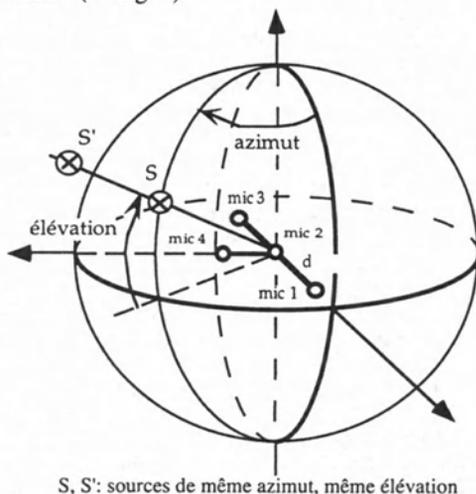


fig. 3: principe de localisation par goniométrie (en haut): le front d'onde incident parvient successivement à trois microphones; à partir de la mesure de t_1 et t_2 , on calcule l'angle d'incidence α . Disposition du système expérimental (à droite): un quatrième microphone permet de disposer d'un double goniomètre (2 systèmes indépendants de 3 microphones chacun)



S, S': sources de même azimut, même élévation

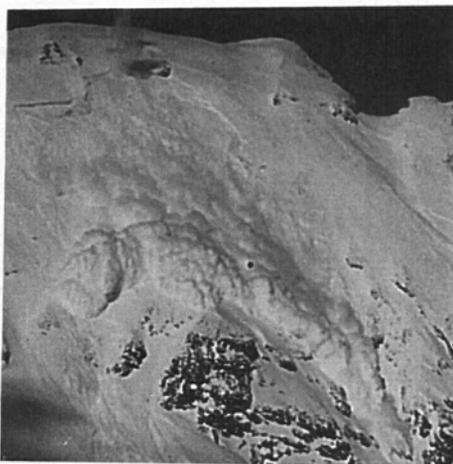
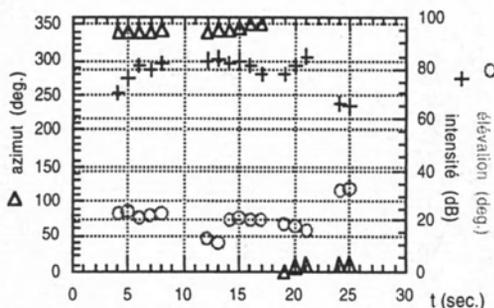


fig. 4: avalanche de Chamossaire déclenchement artificiel (en haut), résultat obtenu par goniométrie (à droite)



Le goniomètre détermine chaque seconde l'azimut, l'élévation et l'intensité des infrasons reçus dans une bande de fréquence comprise ici entre 1 et 5 Hz:

- intensité : entre 65 et 83 dB re 20 μ Pa,
- azimut: première partie de la trajectoire à azimut constant - env. 340° / Nord -, puis augmentation progressive correspondant au trajet effectivement suivi par l'avalanche (déviation dans une combe)
- élévation: varie entre +/- 31°.

* en valeur absolue

5. BILAN DE L'EXPÉRIENCE

La campagne expérimentale de l'hiver 94/95 a permis de vérifier l'émission d'infrasons par les avalanches de neige poudreuse, et démontré la faisabilité d'une détection automatique basée sur leur captation. La portée du système expérimental actuel est évaluée à plusieurs km (exemple: détection d'une avalanche poudreuse de grande ampleur s'étant produite à 8 km, sur un versant opposé - *Tubang 13.01.95*); toutefois, certaines avalanches plus proches n'ont pas été détectées. On distingue deux types de limitations:

- celles intrinsèques à la méthode:
 - caractéristiques de l'émission acoustique des avalanches, en particulier avalanches de neige humide, petites avalanches, etc.
 - propagation des infrasons en montagne en conditions hivernales (réflexions, atténuations)
 - effets du vent et d'autres sources - naturelles ou artificielles - d'infrasons
- celles du système expérimental lui-même:
 - bruit de fond élevé des microphones en très basses fréquences
 - limite inférieure de la bande passante d'env. 1 Hz
 - exposition importante au vent (mâts haubanés).

Une base de données a été constituée, comprenant, outre l'enregistrement de l'émission acoustique d'environ 150 avalanches, les résultats continus obtenus par goniométrie (mesures 24h/24, sur une période de 6 mois) et les films vidéo et diapositives d'un tiers des avalanches. Parallèlement, dans le cas des zones de départ et d'arrêt de plusieurs avalanches de grande ampleur, des prises de vue aériennes photogrammétriques ont été réalisées juste avant et juste après. Ces vues permettent la détermination des volumes de neige (Castelle, 94).

6. PROBLÉMATIQUE DE LA PRISE DE SON

L'optimisation de la prise de son constitue un élément technique essentiel conditionnant la conception d'un système opérationnel. La figure suivante montre le dispositif de prise de son utilisé, alors que le graphique indique le bruit induit par le vent.

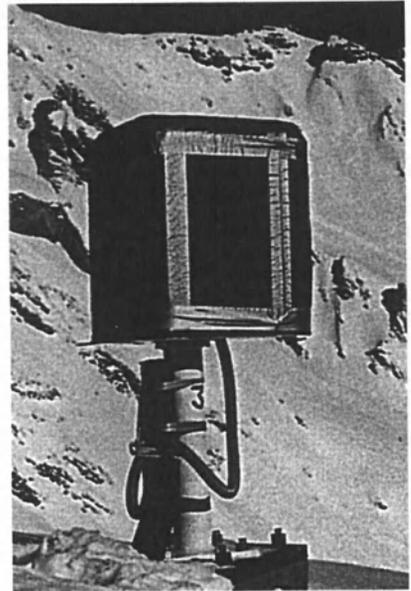
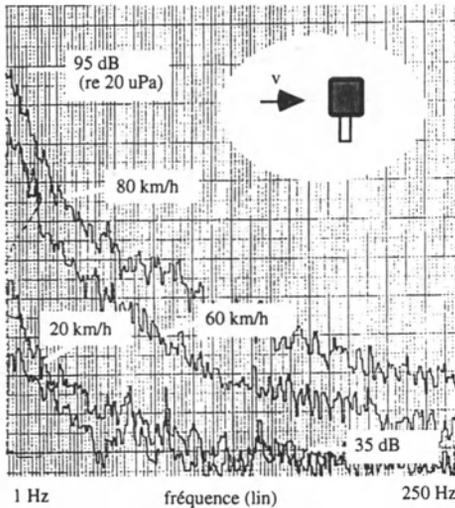


fig. 5: microphone, fixation et système de protection (à droite), efficacité du dispositif de protection contre le bruit induit par le vent (en haut)

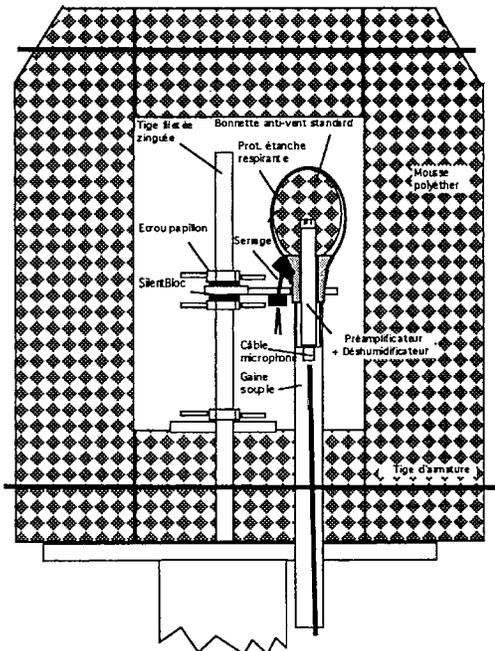


fig. 6: coupe schématique du dispositif de prise de son utilisé

- le microphone* a été fixé au moyen d'une pince conçue pour filtrer les vibrations mécaniques se produisant dans l'axe de sa membrane (oscillations du mât, vibrations sismiques).

- une première bonnette sphérique protège le microphone; elle est coiffée d'une membrane textile respirante afin d'éviter une éventuelle condensation due au chauffage du microphone par l'intermédiaire du préamplificateur (alimenté)

- un déshumidificateur assure le séchage de l'air à l'arrière de la membrane, à laquelle est appliquée la tension de polarisation

- la bonnette extérieure a été réalisée en mousse Polyéther S3070, matière dont la structure à pores ouverts assure une limitation très importante du flux d'air (vent), sans provoquer d'atténuation des ondes de pression acoustique dans la gamme de fréquences utiles

- une armature assure la tenue mécanique du dispositif extérieur, entièrement découplé du système primaire de bonnette et du microphone

- de couleur noire, la bonnette secondaire n'a jamais été recouverte de manière importante par de la glace; un effet de drainage de l'eau de fonte vers la base du système a été observé; en fin de saison, et après un hiver complet sans intervention, aucun dommage important n'a été observé, excepté une brûlure superficielle de la surface extérieure (rayonnement solaire)

7. RECONNAISSANCE AUTOMATIQUE D'ÉVÉNEMENTS

Outre les avalanches, il existe de nombreuses autres sources d'infrasons - aussi bien naturelles (orages, etc.) qu'artificielles (avions, centrales, etc.). Se pose donc le problème de la reconnaissance automatique de ces événements.

Avec le système actuel, la reconnaissance est effectuée manuellement à partir de l'identification des signatures acoustiques: il est aisé de distinguer visuellement dans un sonogramme la signature du bruit de passage d'un hélicoptère de celle d'une avalanche ou encore d'une installation de remontée mécanique. Toutefois, comment ne pas risquer de confondre une avalanche avec par exemple la mise en marche momentanée d'une installation industrielle en vallée?

Par la possibilité qu'elle offre de déterminer la direction d'une source - ou sa position exacte (par triangulation) - la goniométrie apporte un critère supplémentaire de reconnaissance automatique. Le résultat présenté à la figure 4 montre que le goniomètre expérimental permet de "suivre" la trajectoire d'une avalanche, trajectoire qui ne pourrait par exemple pas être confondue avec celle d'un avion.

Aux critères de durée, de niveau et de fréquence s'ajoutent donc ceux liés à la localisation.

* pour le goniomètre: *Norsonic 1220* + préamplificateur *Norsonic 1201*,
pour l'étude des signatures acoustiques: *B&K 4179* + préamplificateur *B&K 2660*

8. PERSPECTIVES POUR UN SYSTÈME OPÉRATIONNEL

Dans le but d'apporter à terme un système de mesure opérationnel adapté aux outils de prévision locale des risques d'avalanches, le LEMA étudie actuellement les aspects suivants:

- caractérisation de l'émission acoustique des différents types d'avalanches
- optimisation de la prise de son (Rossi, 95)
- propagation des infrasons en montagne en conditions hivernales
- compatibilité du système avec les réseaux existants de stations nivo-météo automatiques.

Pour les campagnes à venir, on envisage de placer des transducteurs à même le sol, sous le manteau neigeux, de manière à éviter la pose de mâts haubanés - souplesse dans le choix des emplacements - et réduire fortement l'exposition au vent.

On envisage également la mise en oeuvre de microphones à bruit de fond plus faible, de façon à augmenter la portée de détection.

9. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le Groupement de l'Armement pour la mise à disposition du goniomètre acoustique, le canton du Valais, en particulier le Service des Forêts et du Paysage, Section dangers naturels, ainsi que la SAREM pour leur constante aide logistique sur le site d'Anzère.

10. BIBLIOGRAPHIE

Bolognesi (R.), Büser (O.), 1995 - Merging data analysis and symbolic calculation into a diagnostic system for natural hazards, *The Emergency Management and Engineering Conference*, Nice

Rossi (M.), Chritin (V.), mai 1995, Microphones pour la détection d'infrasons en montagne, *Journée d'étude sur les transducteurs en milieu hostile, Groupe ElectroAcoustique de la Société Française d'Acoustique*, Paris

Castelle (T.), Sivardière (F.), Guyomarc'h (G.), Merindol (L.), Buisson (L.) 1994 - Drifting snow phenomena and slab avalanches, *International Symposium on Snow and Related Manifestations*, Manali.

Avalanche frequency at Roger's Pass, British Columbia, Canada - *Fréquence des avalanches au Roger's Pass, Colombie Britannique, Canada*

M.J. Smith, D.M. McClung¹

RÉSUMÉ

La fréquence d'avalanche à un endroit précis est le variable primaire dans le calcul de risque, en term d'applications et de décisions d'options de contrôle d'avalanches. Cet étude de fréquences d'avalanche utilise une vaste banque de données de Rogers' Pass, Colombie Britannique (43 courses d'avalanches; 24 années de données). L'étude exhale l'important résultat que la fréquence d'avalanche peut être décrite par une description Poisson. La relation entre les estimations variables du terrain et de précipitation démontre que la fréquence d'avalanche aurait une corrélation avec la rugosité du terrain, 30 années d'équivalence d'eau, la situation est-ouest du sommet, l'exposition au vent et l'élévation et l'inclinaison de la zone d'écoulement. Avec la longue période et la qualité des données, nous croyons que cette analyse est la plus compréhensive qui existe.

ABSTRACT

The frequency of avalanches at a given location is the primary variable for calculating the risk as input to zoning applications and decisions about avalanche control options. In this paper, we present a study of avalanche frequency using an extensive data base of avalanche occurrence records from Rogers' Pass, British Columbia (43 avalanche paths; 24 years of records). This study, the first of its kind for high frequency avalanche paths, yields the important result that the frequency of avalanches may be described by a Poisson distribution. Study of the relation between terrain variables and precipitation estimates shows that avalanche frequency correlates with path roughness, 30 year maximum water equivalent, east-west location from Roger' Pass summit, wind exposure and runout zone elevation and inclination. With the length of avalanche occurrence records and quality of the data, we believe our study of this problem is the most comprehensive in existence.

INTRODUCTION

The magnitude and frequency of avalanches must be known, estimated or guessed at when land-use planning decisions are made concerning risk mapping or plans for facilities in avalanche prone terrain. The magnitude determines the destructive potential or vulnerability (e.g. McClung and Schaerer, 1981; 1993) and the frequency determines the probability of event occurrence at a location. Of the two, the frequency is the most important factor with respect to risk: it can vary over about four orders of magnitude, from several per year to one every several hundred years and therefore the risk can vary over about four orders of magnitude from frequency variations alone. For the frequency component of the risk, it is clear that the risk increases in direct proportion to the frequency.

¹ Department of Geography, University of British Columbia, Vancouver, B.C. V6T 1Z2, Canada.
Tel 604 822 2663, Fax 604 822 6150, Email miksmith@unixg.ubc.ca/mcclung@unixg.ubc.ca

In order to properly specify the frequency component of risk as a probability, we must know the frequency distribution for the frequency of events. In this paper, we present data from an extensive data set for 43 avalanche paths at Rogers' Pass, British Columbia with 24 years of records for paths which show very high frequency (and therefore high risk) in the range of 3 to 20 events per year. From the data, we are able to determine that a suitable probability mass function to describe avalanche frequency at Rogers' Pass is the Poisson distribution. This function is shown to be suitable for all the avalanche paths in our analysis. Given a Poisson distribution to describe the frequency, we then proceed to estimate the encounter probability for determination of the chance of encounter for a given exposure time for a given avalanche path as input to risk calculations.

The data in our study include not only avalanche frequency but also terrain variables and estimates of 30 year maximum water equivalent precipitation (starting zone estimate) for the paths in question. Given these supporting data (14 predictor variables in general) we perform a multivariate analysis to determine which variables are statistically significant in predicting frequency (the response variable). The analysis shows that path roughness, 30 year maximum water equivalent, location (east or west of Rogers' Pass summit), wind exposure and runout zone elevation and inclination are all significant in a multivariate sense. Inclination and elevation of the start zone also have important single variable correlations.

The data set used for this analysis comes from Rogers Pass in BC, Canada. The area is contained within Glacier National Park, which maintains avalanche control on 134 main avalanche paths that effect the Trans-Canada highway in a linear highway distance of 45km. During the winter of 1966 records of avalanche occurrence for 43 avalanche paths were maintained by the National Research Council (NRC). Some paths ceased to be monitored after 1984, with most ending in 1989. The aim in monitoring avalanches was to record all "major" occurrences with particular emphasis on those that ran out in the valley. In the late 1970's the Canadian size classification scheme (McClung and Schaerer, 1981) was incorporated into observations. In general, only avalanches greater than size 2 were recorded. The data set can be considered accurate and provides the best description of avalanche activity so far analysed.

FREQUENCY ANALYSIS - GOODNESS OF FIT

In order to determine how the frequency data relate to a probability mass function or probability density function it is appropriate to apply statistics for goodness-of-fit. This was performed using the Chi-square test. Due to the size of the compiled data set (24 years of data for 43 separate paths) a computer program was written to perform equal-interval chi-square tests on Normal, Poisson, Exponential and Chi-Square distributions.

Since the data are discrete, testing was performed using the equal-interval method, with a minimum expected frequency of 2 (see D'Agostino and Stephens, 1987, for a general discussion of chi-square testing). Figures 1A shows a Poisson distribution fitted to a path from Rogers Pass. This path demonstrates a satisfactory fit, however Figure 1B is an example of a path where fitting the Poisson failed the test.

Results show that, with a minimum expected frequency of 2, the Poisson, chi-square and normal fail in several cases, while the exponential clearly fails in most cases. It should be noted that a normal can approximate a Poisson when the Poisson parameter (μ or path frequency) is greater than 9 and that as μ becomes larger the discrete nature of the data becomes less important. This therefore explains why many paths see both the normal and Poisson passing the goodness-of fit test. Also, the chi-square distribution, at degrees of freedom (ν) greater than 7, may be approximated by a normal. Given that 22 of the 43 avalanche paths have a mean greater

than 9 it is not surprising that these distributions all pass. This picture is further complicated by the use of artillery which artificially increases the frequency of the avalanche paths. Of the 43 paths, 7 have received artillery control since the highway was completed, 4 of these with means greater than 14.

As depicted earlier, Figure 1B is an example of a poor fit to a Poisson distribution. The plot shows a lack of data points in the central area of the distribution while there are several noticeable outliers effecting the way the distribution is fitted. The Poisson underestimates the peak and the tails. The normal and chi-square, although underestimating the peak, provide a better estimate in the tails.

In summation it is clear that an exponential **does not** fit the data, however similarity between the remaining distributions at μ values greater than 9 allow all three distributions to fit. It is important to note that at high μ values (>14) the Poisson distribution is less able to model the variability contained within the data set. Therefore the Poisson appears more appropriate at lower values of μ , while at values greater than 14, the normal produces better results. Paths with values of μ between 5 and 14 perform equally well with all three distributions.

Our analysis shows that, for the above reasons, the Poisson, normal and chi-square are all able to pass the goodness-of-fit test. However, we found that the Poisson distribution gives a satisfactory fit to most of the avalanche data (see Figures 1A and 1B) and it is the most appropriate distribution since the arrival rate of avalanches is a series of discrete, independent events. However, at the higher values of μ (>14) the normal is better able to model the variability that is currently displayed in the avalanches we have analysed. This variability may be more a function of the use of artillery, in combination with effects of outliers. A greater sample size would allow a more definite answer to this question.

Given that the Poisson distribution is the most appropriate distribution, it is possible to use μ for each of these paths as characteristic of the path frequency. As the climatic region will be constant over the area of study, variations in μ should be solely due to terrain parameters. The following section presents an analysis of terrain features for the paths from Rogers Pass.

RELATION BETWEEN FREQUENCY AND TERRAIN PARAMETERS

For this work, we have currently been able to use 24 years of records for the 43 paths contained in the NRC data. This had a mean of 9.76 and a standard deviation of 4.45, with a range of 17.58. This study incorporated 14 terrain parameters. Table 1 shows the terrain parameters, and descriptive statistics, used in the following regression analysis.

Several variables require further explanation:

- (1) 30 year maximum water equivalent - this was calculated from a cube root normal distribution of water equivalent snow depths for the centre of each of the avalanche path catchments.
- (2) Wind Index - a qualitative index of the magnitude of snowdrifting that can be expected in the avalanche starting zone (Schaerer, 1977).
- (3) Roughness - expressed as the water equivalent of snow. It is related to the amount of snow required to cover rocks, shrubs and ledges before avalanches will run.
- (4) Aspect - measured in 16 ordinal units; due to the clustering of northerly and southerly aspects, the data were ranked as either 1 (north) or 2 (south).
- (5) Location - straight line distance in kilometres, East-West from the Rogers Pass summit to where the path dissects the highway (Figure 2).

As an initial step a Pearson product moment correlation matrix was compiled for the 14 variables against the frequency (F). Results indicated that the following variables were

significantly correlated:	
runout zone elevation (RE)	0.47 (0.0016)
roughness (R)	-0.57 (0.0001)
30 year maximum water equivalent (MWE)	0.54 (0.0002)
wind exposure (W)	0.45 (0.0034)
location (L)	0.48 (0.0012)
runout zone inclination (RI)	0.33 (0.0325)

where the first value is the correlation coefficient and the second the level of significance testing at 0.05 significance. Other important single variable correlations included the inclination and elevation of the starting zone.

A multiple stepwise regression was then performed on the above 8 variables, giving the form

$$F = 14.02 - 33.03R + 1.39W + 0.03L$$

5.20	-4.35	2.68	3.74	t-statistic
0.0000	0.0001	0.0111	0.0006	significance level

with an r^2 of 0.57 and a standard error (SE) of 2.93.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

This paper has provided an in-depth study of the frequency of avalanches and attempted to account for their variations with respect to changes in terrain. In fitting different distributions it was found that there was difficulty in distinguishing between a normal, Poisson and chi-square distribution due to similarity between distributions with $\mu > 9$. Given that the frequency of avalanches is a series of discrete, independent events the Poisson distribution is the most appropriate distribution, however a normal may prove more satisfactory with $\mu > 14$.

This result has several important implications for future research. In risk mapping it is now possible to stipulate the Poisson distribution in the calculation of the Encounter Probability. This result can then be used to stipulate return period for calculation of specific risk for a given location.

The second half of this paper concentrated on an analysis of terrain with respect to the frequency. Schaerer (1977) found roughness, wind exposure, fracture point incline (not used in this study) and incline of track to be significantly correlated with frequency, suggesting that conditions in the starting zone (wind exposure, fracture point incline) are the most important factors affecting frequency (along with the incline of the track and roughness). This study suggests, again, that wind exposure is an important variable in avalanche frequency, along with roughness. However, it would appear that location is perhaps a more dominant factor here; both location and the elevation and inclination of the runout zone were significant, with the elevation of the start zone also important. Given that the 30 year maximum water equivalent is so closely correlated with elevation, this variable is more a function of location. A further important factor is the inclination of the start zone.

Conditions in the starting zone are again important, however variations in avalanche frequency appear to be more a function of micro-climate, entered into this study as location within the study area. It would appear the changes East-West and in elevation have significant effects upon the frequency.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Peter Schaerer for data used in this analysis, as well as lending his personal knowledge of Rogers' Pass. Many thanks to Jonathan Henkelman for writing the chi-square testing programme. We are also grateful to the avalanche control personnel at Glacier National Park for data used and their personal knowledge of the area. This work was supported by the Natural Science and Engineering Research Council of Canada.

REFERENCES

- D'Agostino (R.) and Stephens (M.), 1987 *Goodness of Fits Techniques*. New York. Dekker
 Föhn (P.), 1975 - Statistische aspekte bei lawineneignissen, *Internationales Symposium Interpraevent 1975, Innsbruck, Band 1; Sonderdruck*, pp293-304
 McClung (D.M.) and Schaerer (P.), 1981 - Snow avalanche size classification, *Canadian Avalanche Committee, Ed. Proceedings of Avalanche Workshop, Nov. 3-5, 1980. Associate Committee on Geotechnical Research, Technical Memorandum 133. Ottawa: National Research Council of Canada*, pp12-27
 McClung (D.M.) and Schaerer (P.), 1993 - *The Avalanche Handbook*. Seattle. The Mountaineers
 Roscoe (J.T.) and Bryars (J.A.), 1971 - An investigation of the restraints with respect to sample size commonly imposed on the use of the chi-square statistic, *Journal of the American Statistical Association*, V66, pp755-759
 Schaerer (P.A.), 1977 - Analysis of snow avalanche terrain, *Canadian Geotechnical Journal*, V14, pp281-287
 Schleiss (V.G.), 1989 - *Rogers Pass snow avalanche atlas; Glacier National Park, BC, Canada*. Environment Canada

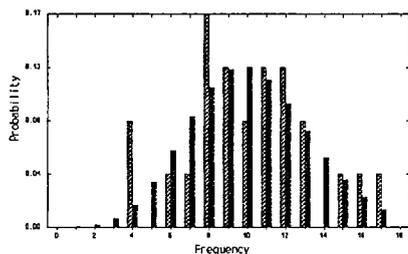


Figure 1A Frequency for Cougar Corner 2 (light) fitted to a Poisson distribution (dark). This path has a frequency of 10.1 events per year. Results of Chi-square test:

Degrees of Freedom	7
Chi-Square Statistic	2.55
Significance Level	0.923

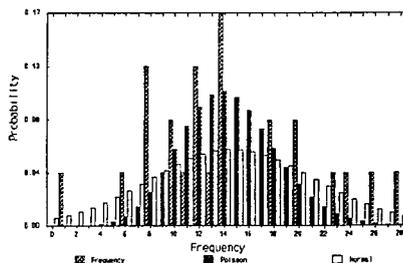


Figure 1B Frequency for McDonald Gully 3 fitted to a Poisson and normal distribution. This path has a frequency of 14.3 events per year. Results of Chi-square test:

	Chi-Square	Poisson
Degrees of Freedom	5	4
Chi-Square Statistic	6.98	13.03
Significance Level	0.222	0.011

Terrain Variables	Mean	SD
frequency	9.8	4.5
path incline (°)	33.8	2.6
track incline (°)	38.5	3.6
start zone incline (°)	38.2	5.0
runout zone incline (°)	21.2	5.8
vertical drop (m)	922	251
path length (m)	1676	443
start zone elevation (m)	2041	248
runout zone elevation (m)	1114	109
*aspect (1-16)	6	4
area of catchment (m ²)	184872	157895
*wind exposure	3.1	1.0
location (km)	-0.8	5.9
30 yr max water equivalent (m)	1.4	0.3
*roughness	0.3	0.1

Table 1 Terrain variables, descriptive statistics and description of data used in the regression analysis. See text for definition of categorical variables denoted by (*).

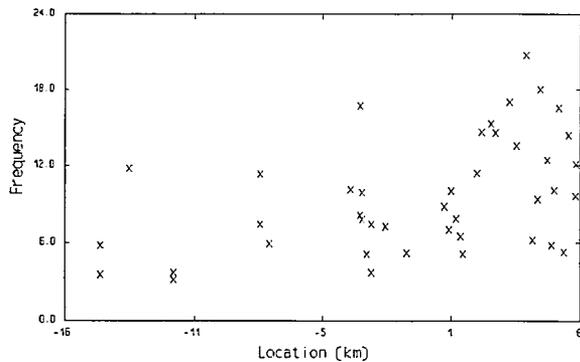


Figure 2 Location of avalanche paths at Rogers Pass with respect to frequency. Location is calculated as distance (km) east-west of the Rogers Pass summit where the centre of the path dissects the Trans-Canada Highway.

Étude du risque d'avalanches dans la partie centrale des Pyrénées espagnoles (région aragonaise)

M^a Teresa Sáez Alagón, S. Rios Aragués¹

RÉSUMÉ:

L'"Instituto Tecnológico Geominero de España" développe depuis trois ans, des cartes de localisation probable d'avalanches dans la partie centrale des Pyrénées espagnoles.

Le lendemain de ce projet essayera de compléter cette cartographie en constituant une base de données géoréférencée (systèmes d'information géographique) tendante à améliorer la prediction et l'établissement d'une prevision future plus précise du risque d'avalanches.

Pour cette exposé, l'accent est mis sur le travail cartographique déjà fait dans notre région.

ABSTRACT:

The "Instituto Tecnológico Geominero de España" is carrying out since three years ago, localitation maps of probable avalanches in the aragonese Pirenees chain.

The objective of this communication is to make these works known which constitute a first necessary pass for the design of a georeferenced data base that allows to improve the prediction and for the establishment of an adequate cartography of avalanches risk that aimed to decrease the loss in human life and in natural goods or materials.

LA PREDICTION D'AVALANCHES DANS LES PYRÉNÉES ARAGONAISES

L'étude du risque d'avalanches dans les Pyrénées rattache tous les rapports qui concerne à la prediction temporelle (sous la responsabilité technique de l'"Instituto Nacional de Meteorología, Centro Territorial de Zaragoza"), et aussi, a la prediction spatiale qu'on est en train de développer à l'"Instituto Tecnológico Geominero de España" à travers de son centre de Zaragoza. Cet étude compte avec la collaboration du Gouvernement d'Aragon, la Direction Générale de la Protection Civile, la Fédération Aragonaise de Montagne et d'autres institutions publiques. Grâce à cette collaboration nous avons publié une fiche-enquête divulgatrice du phénomène avalanche et aussi de l'échelle européenne de clasification de ce risque (*figure 1*). Pour établir un contrôle de cette zone d'avalanche nous demandons l'aide des usagers de l'haute montagne pour la localisation et la description des avalanches observables. Faire connaître les zones probables de déclenchement d'un alud est l'objectif de la prediction spatiale. La base de cette prediction est la réalisation des cartes de localisation d'avalanches qui

¹ Instituto Tecnológico Geominero de España
Tfno: 76/55 51 53 ; Fax: 76/55 33 58
C/ Fernando El Católico 59, 4^oC
50.006 ZARAGOZA (ESPAÑA)

montrent la surface maximale affectée par le glissement de la masse neigeuse. L'établissement d'un inventaire de toutes, permettra planifier l'utilisation du sol et prendre aussi des mesures de prediction, prévention et protection nécessaires.

ÉTAT ACTUEL DE LA PREDICTION SPATIALE

Jusqu'à maintenant, nous avons fait les cartes de localisation probable des zones d'avalanches, à l'échelle 1/25.000, de la surface qui montre la *figure 2* (quadrant nord-est de la feuille 144 de Ansó et de la 145 de Sallent de Gállego). Cettes feuilles comprennent les vallées de Aragüés del Puerto, Aragón y Tena. Cettes cartes permettent de connaître les zones périlleuses pour l'homme ou ses biens.

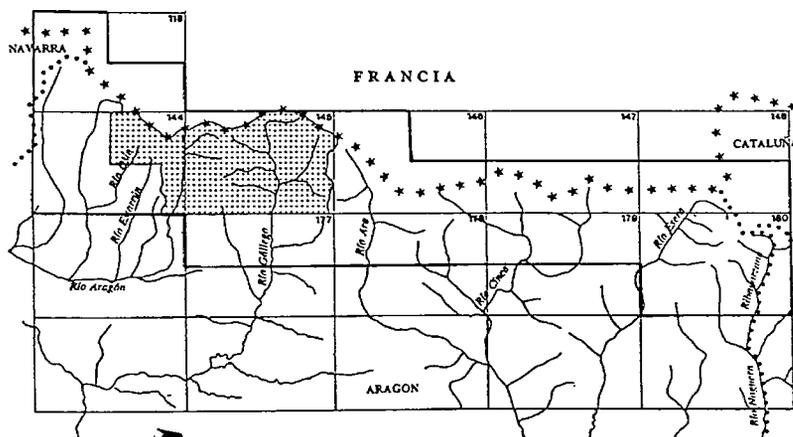


Figure 2.-Emplacement géographique de la surface d'étude et des zones où se sont réalisées les cartes de localisation probable d'avalanches.

- Feuille topographique de l'armée, échelle 1/50.000
- ▭ Limite de la zone d'étude du projet global
- ▨ Zone cartographiée et digitalisée à l'échelle 1/25.000
- ★ Limite de pays
- Limite de la Communauté autonome

L'identification des surfaces avec danger potentiel d'avalanche (Martinelli, 1974) est fait à travers des critères fondées dans l'observation des caractéristiques physiques et morphologiques du terrain et dans les traces que les avalanches laissent après elles, ainsi que dans la connaissance des propriétés mécaniques, thermiques et climatologiques de la neige. La méthodologie de travail se base à l'interprétation des photos aériennes, dans les observations et travaux de cartographie de champ et dans les enquêtes aux habitants des zones de montagne (Masés, 1991; p.25).

Aujourd'hui les cartes sont digitalisées par l'intermédiaire d'un S.I.G. (Systèmes d'information géographique) qui prend comme support l'altimétrie digitalisée pour le service cartographique de l'armée espagnole. Le S.I.G. permettra fondamentalement:

- * Analyse des paramètres intéressant relatif à l'estimation du risque d'avalanches
- * Modification des renseignements
- * Sorties "plotter" qui soient demandées par les municipales, excursionnistes, clubs, etc.

Dans la *figure 3* on expose la légende des cartes de localisation probable d'avalanches.

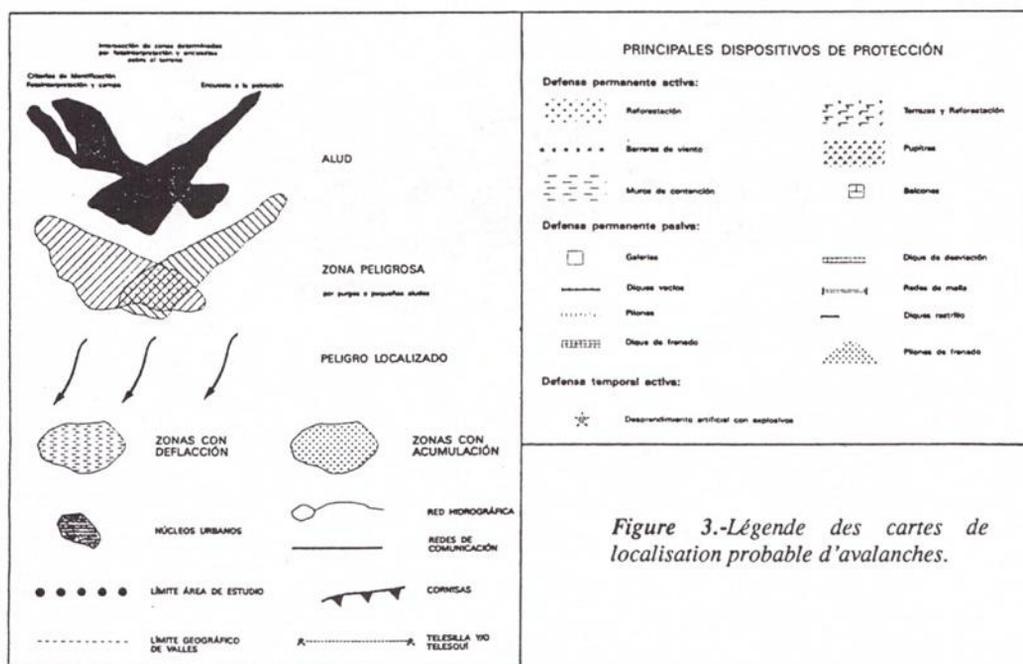


Figure 3.-Légende des cartes de localisation probable d'avalanches.

ACTIVITÉS PRÉVUES

La cartographie des zones avec danger potentiel d'avalanches est un requis préalable pour l'établissement des cartes de risque d'alud. Pour la réalisation de celle-ci, il est nécessaire quantifier et qualifier ce phénomène et évaluer le milieu naturel possiblement endommagé (délimiter les dimensions de l'événement, la plus grande surface d'arrivée, le volume de la neige déplacée et le période de retour de cet alud). (Figure 4)

L'"Instituto Tecnológico Geominero de España", avec la collaboration des institutions impliquées dans l'étude et l'analyse a prévu la réalisation d'une base des données géoréférencée laquelle permettra le stockage et traitement des renseignements obtenus, tant graphique, numérique ou descriptive, rapportable à la neige, la couche neigeuse et l'occurrence d'avalanches.

Ce banc des données permettra obtenir séries temporelles et spatiales des paramètres qui améliorent l'estimation de la prediction, le danger et le risque d'avalanches, compris comme la valeur attendue des pertes d'un bien déterminé par l'effet d'un alud.

Par avant il faut la collaboration des habitants et usagers de l'haute montagne: pratiquants des sports d'hiver, habitants des villages et quartier d'hiver, détachement de l'armée et de la gendarmerie espagnole, gardes forestiers, personnels des stations de ski, etc.

En ce sens on a déjà établi d'accords personnels de collaboration avec tous ces secteurs de la population, lesquelles renseignent et envoient leurs données à l'Instituto de toutes les avalanches déclenchées et observées dans chaque zone de travail.



Figure 4.-Eftes destructifs des avalanches: La nuit du 22 al 23 février de 1915 c'est déclenchée un grand alud dans le Balnéaire de Panticosa (Huesca) lequel, en descendant du versant des "Argualas", a détruit totalement divers bâtiments (La casa de la pradera, la casa de la laguna) et a provoqué des dégâts graves en d'autres (le Casino dans l'image et les hôtel Continental et Embajadores). Archive photographique "Foto Peñarroya" Jaca (Huesca).

OBJECTIF FINAL

L'établissement et la diffusion des cartes de risque d'avalanches dans les Pyrénées centrales, essaient de réduire le risque de pertes de vies humaines et les impacts que sur l'environnement (des forêts et sol principalement) et les constructions civiles peuvent produire ce phénomène naturel.

Cettes cartes sont une base très importante pour améliorer l'aménagement du territoire de montagne, de plus en plus fréquenté et demandé touristiquement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

*Ayala (F.J.), 1990 - Análisis de los conceptos fundamentales de riesgos y aplicación a la definición de tipos de mapas de riesgos geológicos". *Boletín Geológico y Minero*, Vol.101-3, pp.456-467.

*Martinelli (M.), 1974 - *Snow avalanche sites, their identification and evaluation*. U.S. Government Printing Office.

*Mases (M.), 1991 - *Estudi Geomorfològic de la dinàmica nival i del risc d'allaus a la Vallferrera (Pallars Sobirà)*. Tesis de licenciatura, Departamento de Geología Dinámica, Geofísica y Paleontología de la Facultad de Geología de la Universidad de Barcelona.

*Muñoz Trigo (P.), 1986 - *Prevención y defensa contra aludes. Aplicación práctica al Pirineo aragonés*. Tesis doctoral, Esc. Tec. Sup. Ingeniería de Montes. Universidad politécnica de Madrid.

Détermination de la résistance mécanique de la neige à l'aide du Pandalp

D. Daudon¹, E. Flavigny¹, S. Borel²,
R. Gourves³, Y. Page⁴

RESUME

Le Pandalp est un pénétromètre dynamique de terrain avec acquisition informatisée des mesures. L'innovation majeure par rapport à la sonde de Haefeli concerne l'estimation de l'énergie de battage de la sonde. Lors des essais, l'acquisition informatisée de la pénétration de la sonde, et de l'énergie de battage correspondante permet de nombreuses mesures, et un dépouillement aisé à l'abri des conditions climatiques. Des comparaisons de profils stratigraphiques obtenus par battage classique et par Pandalp ont été faites. Si les profils ont la même allure, la résolution est nettement en faveur du Pandalp, la détection de couches d'épaisseur de l'ordre du centimètre étant courante. Ces performances sont intéressantes pour la compréhension des phénomènes de déclenchement des avalanches de plaques notamment. Des corrélations ont été étudiées avec d'autres paramètres: masse volumique, résistance au cisaillement. Une application à l'étude topographique des zones de transport par le vent a été faite.

ABSTRACT

The Pandalp is a dynamic in situ penetrometer with computer assisted recording of measurements. The major innovation since the classical swiss ramsonde is the estimation of beating energy transmitted to the sonde by the cinetic energy of the hammer. The automatic recording of penetration in the snow and of the beating energy allow a lot of testing even under unfavorable climatic conditions. A comparison between classical sounding and Pandalp's one has been made and shows a very good resolution for the Pandalp stratigraphy with the detection of small layers of one cm thick. Those performances are interesting for the comprehension of slabs avalanches release phenomena. Other results of some correlations with physical parameters are presented . An application on the topography of a snow drift area is also described

INTRODUCTION

La mécanique des sols a contribué depuis longtemps à améliorer la connaissance du comportement de la neige. Les même approches ont été utilisées souvent avec succès, et les mêmes appareillages expérimentaux ont été employés après quelques modifications mineures. Le Pandalp (pénétromètre dynamique portable autonome et automatisé) est un exemple supplémentaire : la version « sol » de ce pénétromètre dynamique a été récemment adapté de façon à pouvoir déterminer les profils de stratigraphie mécanique du manteau neigeux suivant les

¹ enseignant-chercheur, Laboratoire Sols, Solides, Structures UJF, INPG, CNRS ,BP53, 38041 Grenoble Cedex 9
tel : 76825296, fax 76827000, Email : daudon@img.fr, flavigny@img.fr

² étudiante DEA , Laboratoire Sols, Solides, Structures.BP53, 38041 Grenoble Cedex 9

³ enseignant chercheur, Laboratoire Génie Civil, CUST, Université de Clermont Ferrand, BP 206, 63174 Aubières

⁴ Chercheur, université de Savoie, Chambéry

principes de la sonde de Haefeli. Ces tests in situ de résistance à la pénétration sont essentiels à la connaissance du manteau neigeux et de son évolution, et interviennent donc dans la prévision des avalanches.

PRESENTATION DE L'APPAREILLAGE

Principe

Le Panda (pénétrömètre dynamique autonome portable assisté par ordinateur) est né d'un projet réunissant une université et une entreprise privée soutenu par le ministère de la Recherche. Destiné au contrôle du compactage des sols de barrages ou de remblais routiers, il a été adapté au matériau neige, essentiellement en utilisant la même sonde que celle de Haefeli et en fabriquant les éléments de la tête en polyéthylène afin d'alléger l'ensemble (F. MARTIN 93). L'appareillage a été utilisé avec succès deux hivers de suite quotidiennement à la station d'Avoriaz. Actuellement le Pandalp peut également être équipé d'une sonde de température qui permet d'associer les profils mécaniques aux profils de température. Le principe de fonctionnement est donné sur le schéma figure 1

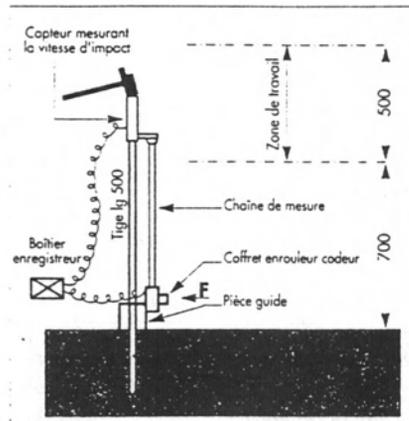


figure 1: principe de fonctionnement du Pandalp

L'énergie de battage de la sonde est évaluée, par la mesure de la vitesse d'impact d'une pièce de frappe située dans la tête du Pandalp et assimilée à l'énergie cinétique. La pénétration de la sonde est mesurée à l'aide d'un capteur de déplacement. Un automate à mémoire portable enregistre ces mesures et calcule automatiquement la résistance dynamique de pointe à partir de la formule suivante « dite des Hollandais » dont certains paramètres ont été adaptés:

$$q_d = \frac{1}{AF} \frac{\frac{1}{2}MV^2}{e} \frac{M}{P+M}$$

qd: résistance de pointe,
 F: coefficient de efficacité (F=2),
 M: masse frappante,
 V: vitesse d'impact,
 e: enfoncement de la sonde,
 P: masse frappée,
 A: section de la pointe (12 cm²)

Le Pandalp testé depuis deux hivers a montré un certain nombre d'intérêts:

- facilite des essais en conditions climatiques plus rigoureuses.
- nécessite un seul opérateur.

- fiabilise la mesure.
- informatise le traitement des mesures.
- permet des campagnes de mesures nombreuses.

La mise en place est aisée même sur des zones de fortes pentes, et l'essai est rapide (environ 20 minutes). L'autonomie mémoire du boîtier permet environ 15 sondages à 2.5 m de profondeur. L'appareillage pèse environ 10 kg et tient facilement dans un sac à dos.

ESSAIS DE VALIDATION DE L'APPAREILLAGE

Les premiers essais du Pandalp ont concerné :

- la validation de l'appareil et des comparaisons avec la sonde de Haefeli
- des corrélations avec d'autres paramètres physiques et mécaniques du manteau
- l'étude d'un manteau neigeux soumis au vent sur le site du Col du Lac Blanc (alpe d'Huez)

comparaison sonde de Haefeli-Pandalp

Les profils stratigraphiques obtenus au cours de l'hiver 93-94 ont montré une très bonne correspondance entre la sonde de Haefeli et le Pandalp. On constate une meilleure précision des profils Pandalp (figure 2). Plusieurs couches minces de glace, détectées au Pandalp n'apparaissent pas avec la sonde. En effet, l'énergie de frappe peut être adaptée presque continûment par l'opérateur en fonction de l'enfoncement mesuré.

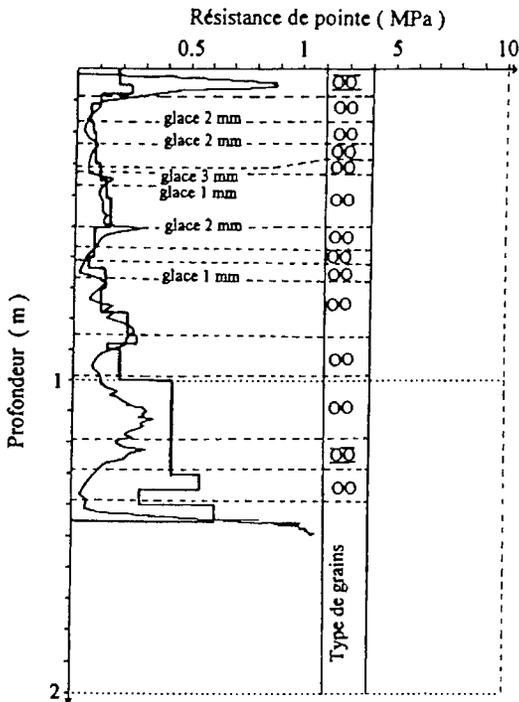


figure 2 : résultat type de comparaison sonde-Pandalp

Compte tenu du nombre d'essais effectués, des corrélations entre les résistances de pointe obtenues avec les 2 appareillages sont données figure 3

Les coefficients de corrélations obtenus sont satisfaisants, que nous considérons l'ensemble des grains ($r = 0.77$) ou seulement les grains ronds ($r = 0.8$) (FLAVIGNY & al 1994). D'autres corrélations multiples avec la teneur en eau liquide, masse volumique, température, type de grains... n'ont pas donné de résultats significatifs hormis confirmé une relative corrélation entre masse volumique et résistance à l'enfoncement (THULLIER 1994).

Régression de la résistance R de la sonde de battage sur Qd Pandalp

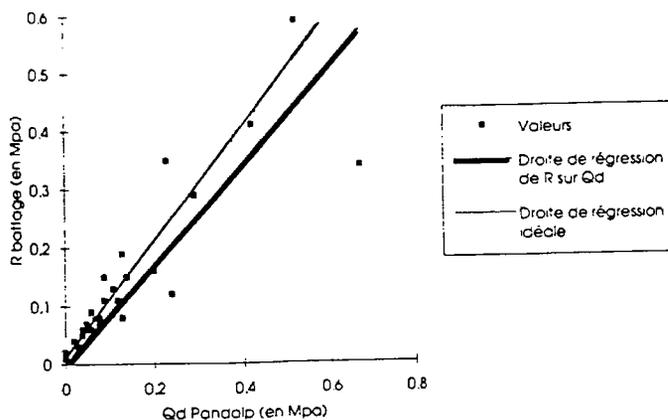


figure 3 : Régression linéaire et corrélation sonde de Haefeli - Pandalp

corrélation Résistance au cisaillement - Résistance à l'enfoncement

Durant l'hiver 94-95 des études de corrélations entre mesures de résistance au cisaillement (obtenues au scissomètre) et résistance à l'enfoncement au Pandalp ont été faites : ces deux paramètres sont bien corrélés dans les sols et la cohésion (résistance au cisaillement sous contrainte normale nulle) est un paramètre simple nécessaire à certains modèles comme ELSA (BUISSON & al 1993) ou MEPRA (GIRAUD G. 1992). L'échantillonnage comportait 180 mesures. Les résultats montrent un nuage de points (figure 4) signifiant qu'aucune corrélation n'existe malgré tout le soin apporté aux essais (S. BOREL à paraître 1995). Il en est de même avec la sonde de Haefeli (BRUN E., REY L. 1987) Il serait intéressant de trouver un paramètre mécanique pertinent du manteau neigeux et corrélant avec les résistances à l'enfoncement permettant d'avoir des modèles simples.

Répartition des valeurs de cohésion de la neige en fonction de la résistance de pointe

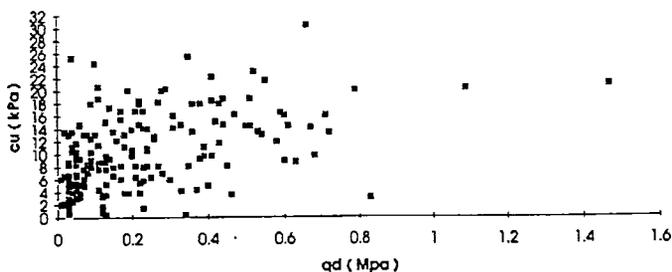


figure 4 : corrélation mesures de cisaillement - résistance à l'enfoncement au Pandalp

variabilité spatiale

Sur le site du col du Lac Blanc on a souhaité étudier la variabilité spatiale stratigraphique du manteau neigeux. Sur une surface 100 m² deux lignes de 10 sondages sur 2,5 m de profondeur à 2 m d'intervalle ont été effectués à un mois d'intervalle. Une comparaison stratigraphique entre les deux journées est en cours ainsi qu'un calage par rapport aux simulations effectuées avec CROCUS⁵ et la stratigraphie. Les résultats d'une journée sont représentés figure 5. Les simulations de manteau neigeux par CROCUS et la coupe effectuée le jour même sont superposés aux sondage Pandalp. On peut suivre facilement le long de la ligne de mesures l'existence de différentes couches mécaniques en repérant les zones similaires d'un profils à l'autre (pic, signal plat, faibles variations...).

La superposition avec les simulations données par CROCUS ne peut être immédiate puisque le site subit un transport important par le vent (hauteur réelle de neige supérieur à 4.5 m, hauteur simulée 2.5 m). Le décalage entre les profils réels et prévus paraît être tel que les sondage au Pandalp n'atteignent pas les zones de neige en faces planes.

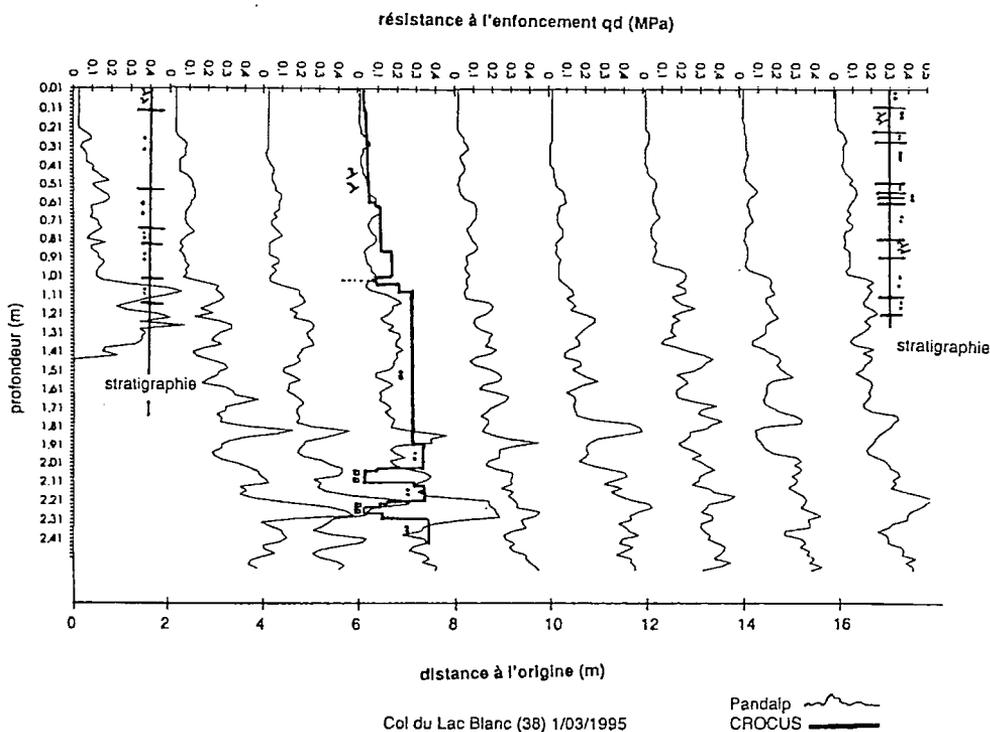


figure 5 : évolution spatiale de la stratigraphie du manteau

⁵ logiciel de simulation de l'évolution du manteau neigeux du Centre d'Etude de la Neige (Météo France)

CONCLUSIONS

De nombreux essais ont été effectués avec le Pandalp, l'ensemble des résultats est particulièrement satisfaisant :

- la résolution des profils stratigraphiques est beaucoup plus fine qu'avec la sonde de Haefeli puisque des couches de quelques millimètres peuvent être détectées.
- l'enregistrement automatique des mesures permet une utilisation beaucoup plus fiable et plus rapide autorisant des campagnes de grande envergure.
- la corrélation entre les résistances de pointe à la sonde de Haefeli et au Pandalp sont satisfaisantes, mais comme avec la sonde, la corrélation avec le paramètre résistance au cisaillement-cohésion est inexistante.
- l'utilisation du Pandalp pour l'étude de la variabilité spatiale du manteau neigeux permet le suivi de la stratigraphie mécanique sur les zones de fort transport de neige par le vent. Un dépouillement approfondi des essais est en cours.

Les perspectives de ce premier travail sont nombreuses : la facilité d'utilisation du Pandalp fait de la résistance à l'enfoncement un paramètre mécanique intéressant pour la modélisation des avalanches. Un deuxième paramètre serait nécessaire pour mieux prendre en compte les phénomènes de déclenchements. Nous intéressant particulièrement aux avalanches de plaques, la résistance en traction du manteau est probablement à considérer en plus de la cohésion. Bien entendu la modélisation du manteau ne peut être réduite à de simples considérations mécaniques. Il importe donc que le modèle soit intégré dans les chaînes de prévision du risque d'avalanches déjà existantes, et qu'il complète les connaissances actuelles d'évolution du manteau.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le Pole Grenoblois pour l'étude des Risques Naturels pour son soutien financier, ainsi que la station d'Avoriaz (73) qui a accueilli les étudiants stagiaires durant deux hivers.

BIBLIOGRAPHIE

- BOREL S 1995:** Rapport de DEA à paraître en juillet 95
- BRUN E. REY L. 1987** Bilan de la campagne de mesures mécaniques dans la neige effectuée sur le terrain durant l'hiver 1984-1985 - Note de travail interne n°199 - Météo France - 37 p.
- BUISSON L.-CHARLIER C.1993** Avalanche modelling and integration of expert knowledge in the ELSA system *Annals of Glaciology*, Vol. 18. pp 123-127
- FLAVIGNY E, DAUDON D, GOURVES R., NAVARRE J.P. 1994** - Snows mechanics and soils mechanics: in situ and laboratory testing - International symposium on snow and related manifestations (Snow symp 94), 26-28 set 1994, Manali, India, pp 161-165
- GIRAUD G., 1992** - "MEPRA : an expert system for avalanche risk forecasting". Proceedings of the International Snow Science Workshop, 4-8 Oct. 1992, Breckenridge, Colorado, U.S.A., p 97-106
- MARTIN F. 1993** Application du panda et d'un scissomètre à moteur à la caractérisation mécanique du manteau neigeux. projet de fin d'études. CEN-CUST 1993
- THULLIEZ J F 1994**, Caractérisation mécanique du manteau neigeux au Pandalp, mémoire de fin d'étude, Juin 1994, 116 p

Méthodologie pour l'étude des plaques de neige à partir de données nouvelles

A. Duclos¹, R. Bolognesi²

RESUME

Divers systèmes de prévision des avalanches ont été conçus au cours de ces dernières années. Certains d'entre eux utilisent des connaissances expertes pour fournir des diagnostics et montrent de bons niveaux de performances... mais sans atteindre encore la fiabilité totale. Les erreurs de prévision peuvent avoir de multiples origines dont une connaissance insuffisante de certains aspects du phénomène à prévoir, et en particulier, de certaines circonstances de rupture du manteau neigeux. Ainsi, les avalanches de plaques, si fréquentes en haute montagne, restent encore parfois bien inattendues. Le présent projet a pour objectif de tenter d'apporter quelques éléments de connaissance nouveaux sur les conditions de formation et de rupture des plaques de neige; il fait suite à deux années d'étude préliminaire.

La méthodologie adoptée jusqu'à présent est basée sur des observations de terrain à la fois fréquentes, précises, fiables et régulières, réalisées sur deux pentes particulièrement avalancheuses d'un domaine skiable; elles concernent essentiellement le transport de la neige par le vent et l'évolution de la qualité de la neige de surface. Ces observations sont complétées par les relevés nivo-météorologiques locaux ainsi que par une observation précise de l'activité avalancheuse environnante. L'examen des premiers résultats a suggéré une relation entre qualité de neige de surface et probabilité de déclenchement accidentel. Il a aussi souligné la complexité de la relation entre situation nivo-météorologique, composantes géographiques et répartition spatiale des déclenchements.

Une poursuite de l'étude est en cours, enrichie par la mise en oeuvre de techniques de laboratoire pour l'observation de la neige (utilisation de l'iso-octane) et pour le traitement des données spatialement référencées (recours à un système d'information géographique). Nous souhaitons ainsi être en mesure de répondre à des questions que nous nous sommes posées, aussi bien en tant que prévisionnistes qu'en tant qu'alpinistes.

ABSTRACT

Various avalanche forecasting systems have been worked out over the past few years. Some of them have recourse to expert knowledge and prove fairly efficient in the wide range of diagnosis they provide... but still fall short of complete reliability. Mistaken estimates can be due to various causes among which an insufficient knowledge of some aspects of the foreseeable phenomenon, and particularly the given circumstances under which a break-up of the snow surface is likely to happen. Actually, slab avalanches, however frequent in high mountains, may still remain unexpected. The present project, following research carried out over two years, aims at trying to bring forward some new elements concerning the formation and break-up of snow slabs.

Methods adopted so far have been based upon a series of regular, frequent, precise and reliable field observations conducted along a couple of slopes of a ski resort, heavily subjected to avalanches. These observations are especially related to the transport of snow in windy

¹Transmontagne, Le Thabor, 73500 F - Valfréjus, tél : 33-79-05-32-71, fax : 33-79-05-01-46

²IFENA, Flüelastrasse 11, CH- 7260 Davos-Dorf, tél : 41-81-417-01-53, fax : 41-81-417-01-10

conditions and the evolution of the quality of the surface snow and, moreover, have been complemented by both nivo-meteorological local observations and also a precise observation of avalanche activity in the surrounding areas. Examining the first results has, on one hand, pointed out a likely relationship between the quality of surface snow and the high probability of an avalanche release and, on the other, the complex connection to be found between the nivo-meteorological data, the geographic constituents and the various locations of snow release. Some more research is being carried on, with the addition help of laboratory technology based on the observation of snow (use of iso-octane) and the processing of data related to precise spatial references and obtained through a Geographic Information System. We thus wish to be in a position to answer questions that we have previously asked ourselves both as "forecasters" and mountaineers as well.

INTRODUCTION

Le développement de systèmes de prévision du risque d'avalanches, notamment de systèmes à base de connaissances, a nécessité dans un premier temps la formalisation du savoir. Des incertitudes ont ainsi été mises en évidence, confirmées lors des validations. Complément des travaux de modélisation physique ou numérique en cours, notre étude a pour objectif d'apporter des précisions nouvelles, basées sur des observations de terrain.

1. OBJECTIFS

Prévoir les avalanches constitue souvent l'unique moyen de s'en protéger. Aussi, depuis de nombreuses années, des équipes de chercheurs s'efforcent de mieux connaître la neige et de comprendre le phénomène avalanche. Ce travail continu a permis de mieux cerner certains mécanismes et, si le "mystère avalanche" n'est toujours pas totalement élucidé, les connaissances acquises ont toutefois permis d'élaborer de premiers systèmes de prévision informatisée. Ces systèmes ont recours à diverses méthodes de résolution basées sur le calcul statistique et/ou symbolique. L'approche statistique (Buser,1989, Guyomarc'h et al,1994, McClung et al,1994) fournit des résultats très intéressants mais nécessite d'importantes masses de données. Cette condition étant assez limitative, on a, bien sûr, cherché des alternatives à l'approche statistique. Et en constatant que certains experts humains étaient capables d'une étonnante fiabilité de diagnostic, on a tenté de reproduire leurs raisonnements à l'aide de systèmes experts. A ce jour, quelques programmes de ce type sont opérationnels, apportant une aide à la prévision des avalanches à l'échelle d'une région ou d'un massif (Giraud,1992,1994, Schweizer et al,1994), ou à l'échelle locale (Bolognesi,1993,1994).

Dans l'ensemble, les tests de validation effectués montrent que les performances de ces systèmes sont honorables mais que la fiabilité totale n'est pas atteinte. En examinant les erreurs de diagnostic, on peut discerner différentes causes : données erronées, mauvaise représentativité des observations, ou méconnaissances de certains processus. Cette méconnaissance concerne notamment les plaques de neige. En effet, de nombreuses interrogations subsistent à leur sujet. Tous les praticiens ont constaté depuis longtemps que le schéma traditionnel "plaques sur les versants sous le vent" est excessivement réducteur et a surtout valeur pédagogique.

Ainsi, on ne peut pas se contenter de règles du type :

"Si vent de Nord, alors plaques sur versants Sud".

Car sans être fausses, ces règles sont trop simplistes et ne suffisent pas à une prévision nuancée des avalanches (Pour une direction de vent donnée, on observe que des plaques peuvent se former sur des versants de diverses orientations).

Hélas, en dehors de ce précepte, il n'existe pas d'autre règle pratique permettant d'évaluer avec quelque certitude :

- la présence d'une plaque,
- la "fragilité" d'une plaque.

Comment identifier les plaques (avant l'avalanche !) sans équivoque ?

Quelles sont les conditions nécessaires et suffisantes à leur rupture ?

L'un des objectifs du projet de recherche ici présenté est d'apporter des éléments de réponse à ces deux questions fondamentales pour une prévision pertinente des avalanches, et de les intégrer à des bases de connaissances de systèmes experts.

2. METHODE

Après avoir exposé le principe de la méthode adoptée, nous présenterons le protocole d'observations suivi.

2.1. Principe

La méthode adoptée au cours notre étude a pour objectif prioritaire de produire des résultats susceptibles d'améliorer significativement les performances de systèmes de prévision existants (Nxlog, MEPRA, ELSA).

Les cinq étapes suivantes seront donc abordées au cours des deux années à venir :

- Observations : elles constituent la base de l'étude; chaque événement avalancheux observé est documenté aussi précisément que possible.
- Archivage des données : la mise en oeuvre d'outils modernes et puissants (SGBD, SIG) doit permettre le traitement ultérieur des données mais aussi un accès facile à l'information, qu'elle soit sous forme alphanumérique ou graphiques. Par ailleurs, nous attendons du recours à un système capable de traiter des données spatialement référencées la production de nouvelles données (notamment les caractéristiques géographiques des ruptures).
- Analyse des données : le caractère exploratoire de nos travaux conduit à la saisie d'un grand nombre de données dont le rôle est seulement supposé. L'utilisation de l'analyse multivariée semble donc indispensable à la distinction des données informatives et à l'estimation du poids des variables. Des liens de causalité et des corrélations seront ensuite recherchés.
- Formulation de nouvelles règles expertes : issues des conclusions de l'analyse des données, elles sont destinées à enrichir la base de connaissances de systèmes experts de prévision.
- Validation des règles : leur pertinence est testée sur des épisodes bien documentés dans divers massifs alpins. Cette étape donnera probablement lieu à de nouvelles formulations puis à de nouveaux tests (démarche itérative).

2.2. Observations

Site d'observation

En choisissant le domaine skiable de Valfréjus pour nos observations, nous bénéficions d'un accès facile à un secteur qui comprend des pentes d'inclinaison suffisante (25° à 35°) selon toutes les orientations et dans une large tranche d'altitudes (1550 m. à 2730 m). Deux de ces pentes ont été sélectionnées en tant que "pentes-test" : avec une inclinaison régulière proche de 30°, elles sont chacune dominées par une épaule fréquemment balayée par le vent et subissent tous les hivers une activité avalancheuse importante. Seule l'une des deux est soumise au déclenchement artificiel.

Techniques d'observation

Afin d'approcher de façon globale le phénomène avalancheux deux protocoles d'observation ont été prévus : d'une part des observations sont réalisées systématiquement dans les pentes où des avalanches sont attendues (pentes-test), d'autre part des observations sont réalisées

ponctuellement lorsque des avalanches accidentelles se produisent en un quelconque point du domaine skiable.



Figure 1 : mesure de hauteur de neige sur les pentes-test.

- Les observations réalisées dans les pentes-test sont les suivantes :

- Hauteur et répartition de la neige accumulée. Des perches graduées sont plantées tous les 5 m selon la ligne de plus grande pente et sur une distance allant jusqu'à 100 m (linéaires) en aval de l'épaule. Une observation est réalisée une à trois fois par jour par un observateur se déplaçant à pied ou à ski. Quelque soient les conditions nivo-météorologiques, la précision des relevés est de l'ordre du cm.
- Qualité de la neige récente. Une série de mesures est réalisée dans la pente à l'occasion des relevés sur les perches graduées : la température de la neige, sa masse volumique, sa résistance à l'enfoncement et sa résistance au cisaillement sont notées; un échantillon de neige est aussi prélevé systématiquement.
- Ruptures. Lors des opérations de mesures, il arrive que des déclenchements soient provoqués par le passage de l'observateur. Chacune des couches de neige concernées est alors décrite selon le protocole mentionné ci-dessus et l'ensemble de l'avalanche est cartographié. Ces observations sont originales car réalisées immédiatement après l'événement.

A l'occasion de chaque série de mesures, on mentionne la température de l'air ainsi que la direction et la force du vent au niveau de l'épaule. Depuis janvier 1995, deux driftomètres (Bolognesi, 1995) permettent d'évaluer aussi le transport de neige par le vent. Enfin, les passages de skieurs sont notés.

- Les observations réalisées sur l'ensemble du domaine skiable sont les suivantes :

- Activité avalancheuse. L'ensemble de l'activité avalancheuse est cartographiée au jour le jour. L'heure de chaque événement est précisée, ainsi que l'origine des ruptures (déclenchement accidentel ou artificiel, départ naturel). Lorsqu'un événement semble représentatif d'une situation, des prélèvements et des mesures sont effectués selon le protocole adopté sur les pentes-test. Chaque tir d'explosif est noté, ainsi que le parcours des artificiers lors des opérations de déclenchement préventif.

- Mesures nivo-météorologiques. Elles sont réalisées dans le cadre des observations du Réseau d'Observation de Météo-France (altitude du poste : 2200 m) ainsi que pour alimenter la base de faits de NXlog (altitude du poste : 2730 m). Deux sondages par battage hebdomadaires sont aussi effectués.

3. PREMIERS RESULTATS

A l'issue de trois saisons d'observations, il est apparu que certaines stratigraphies sont particulièrement propices au déclenchement accidentel (figures 2, 3, 4), et que, dans les situations induites par le transport de neige par le vent, certains points de la pente sont particulièrement sensibles aux sollicitations extérieures (figure 5).

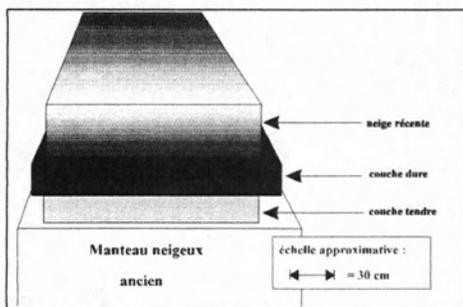


Figure 2 : la rupture par cisaillement se produit dans la couche tendre.

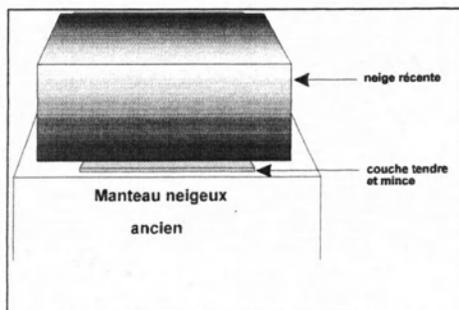


Figure 3 : la rupture par cisaillement se produit dans la couche tendre et mince.

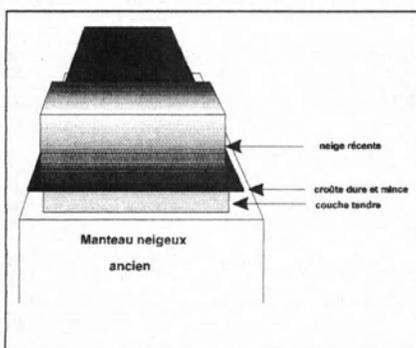


Figure 4 : la rupture par cisaillement se produit entre la neige récente et la croûte dure et mince.

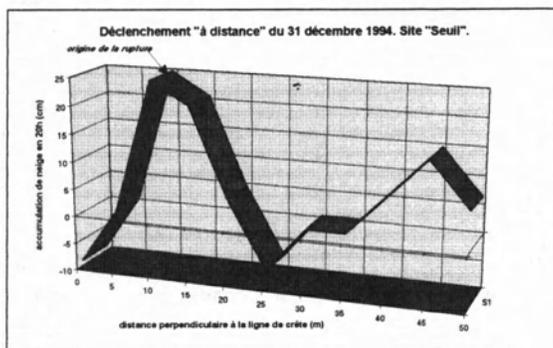


Figure 5 : en cas de transport par le vent, le déclenchement se produit quand la zone la plus chargée est sollicitée; la première rupture visible peut en être très éloignée.

Par ailleurs, la répartition des avalanches accidentelles dans le temps ainsi que les observations au niveau des ruptures nous ont amené à supposer que, pour une stratigraphie adéquate, une certaine qualité de neige de surface est propice au déclenchement accidentel; nous l'avons appelée "qualité critique".

A partir de ce constat nous avons tenté, d'une part de caractériser cette "qualité critique" et d'autre part de préciser la répartition de la neige transportée par le vent.

Etant parvenus à localiser précisément les accumulations issues du transport, nous nous sommes aperçus que la neige qui les constitue peut être de qualité très diverse (de "tendre et légère" à

"lourde et compacte"). L'une d'elles (masse volumique de 120 à 160 kg/m³, résistance au cisaillement de 6 à 18 kN/dm², résistance à l'enfoncement de 4 à 9 kN, température de -5.6 à 0 °C), observée lors de situations particulièrement instables (nombreux déclenchements accidentels), peut aussi être retrouvée dans des zones où la neige s'est déposée sans vent. Dans ce dernier cas (par exemple le 10 avril 1994) la neige, qui constituait auparavant une couche sans cohésion, semble acquérir au fil du temps l'aptitude à être déclenchée en plaque. Cette évolution de la neige de surface, associée probablement à la formation d'une couche fragile et mince sous jascente, pourrait constituer l'un des scénarios expliquant la formation de plaques instables sans intervention du vent (Duclos, 1994).

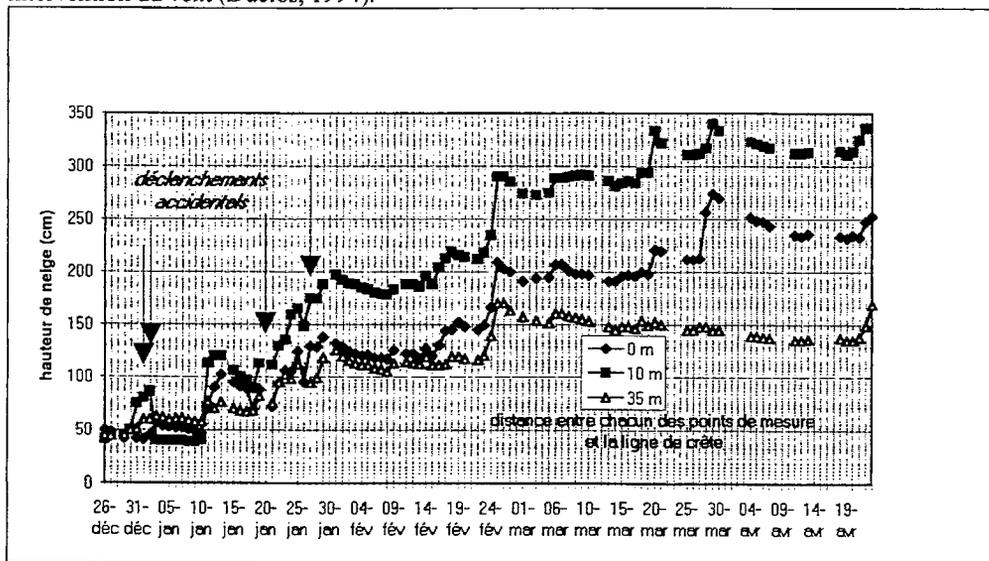


Figure 6 : déclenchements accidentels d'avalanches de plaques et évolution de la hauteur de neige en trois points de la pente du Seuil (saison 1994-1995). La pente a été sollicitée chaque jour de la même façon par le passage de l'observateur.

CONCLUSION

Bien qu'étant parvenus à un bon niveau de performance, les systèmes de prévision des avalanches se heurtent maintenant à des limites imputables à un manque de connaissances, notamment quant aux phénomènes de formation et de déclenchement des plaques de neige.

L'originalité de l'étude menée sur le domaine skiable de Valfréjus réside dans son ambition de parvenir à une approche à la fois globale et précise des avalanches observées. En optant pour des mesures systématiques dans des pentes sensibles, les conditions initiales des déclenchements sont connues. En outre, les situations qui ne donnent pas lieu à des avalanches peuvent aussi être analysées.

Dès à présent, les mesures effectuées pendant les épisodes météorologiques perturbés et immédiatement après le déclenchement d'avalanches permettent d'avancer que certaines plaques sont constituées de neige tendre (résistance à l'enfoncement pour la pointe d'une sonde de battage inférieure à 10 kN). Par ailleurs, il semble que la neige mobilisée lors de ces événements n'ait pas été nécessairement accumulée par le vent.

Nous espérons que l'analyse systématique des mesures, des images des grains prélevés et de la localisation des avalanches nous permette de formuler bientôt de nouvelles règles sur le déclenchement des plaques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bolognesi (R), 1993 - Artificial intelligence and local avalanche forecasting : the system AVALOG. *Proceedings, International Emergency Management and Engineering Conference* (Arlington, VA, 1993), p.113-116, S.C.S., San Diego CA.

Bolognesi (R), Daultier (J.M.), Naaïm (F), Ousset (F), 1995 - Une évaluation quantitative du snowdrift pour la prévention locale des avalanches, *Revue Neige et Avalanches*, n° 69, mars, pp. 2-7.

Bolognesi (R), Buser (O), Good (W), 1994 - Local avalanche forecasting in Switzerland : strategy and tools. *Proceedings, International Snow Science Workshop*, (Snowbird UT). publication prochaine.

Buser (O), 1989 - Two years experience of operational avalanche forecasting using the nearest neighbours method, *Annals of Glaciology*, vol.13, pp.31-34, I.G.S., Cambridge.

Duclos (A), 1993 - Neige, vent et avalanches : quelques observations pour un meilleur pronostic, *Revue Neige et avalanches*, n° 64, décembre, pp. 21 - 27.

Duclos (A), 1994. Les avalanches accidentelles : plaque ou poudre? Analyse d'un cas, *Revue Neige et avalanches*, n° 68, décembre, pp. 2-6.

Giraud (G), 1992 - MEPRA : An expert system for avalanche risk forecasting. *Proceedings, International Snow Science Workshop*, (Breckenridge CO), p.97-104.

Giraud (G), 1994 - Validations of objective models to simulate snow cover stratigraphy and avalanche risk for operational avalanche forecasting. *Proceedings, International Snow Science Workshop*, (Snowbird UT). publication prochaine.

Guyomarc'h (G), Mérindol (L), 1994 - Que faut-il savoir sur Astral ? *Revue Neige et Avalanches*, n°66, pp 21-25

McClung (D.M), Tweedy (J), 1994 - Numerical avalanche prediction : Kootenay Pass, British Columbia. *Journal of Glaciology*, vol 40, pp.350-358.

Schweizer (J), Föhn (P), 1994 - Avalanche forecasting - An expert system approach. *Proceedings, International Snow Science Workshop*, (Snowbird UT). publication prochaine.

Étude expérimentale des paramètres optiques de la neige

Réflectance directionnelle hémisphérique

(domaines spectraux 400/1000 nm et 800/1600 nm)

C. Sergent, E. Pougatch, M. Sudul¹,
B. Bourdelles², C. Leroux³, H. Cachier⁴

RESUME :

Dans le cadre de la modélisation physique du manteau neigeux, le CEN a développé une expérimentation visant à déterminer les paramètres optiques des différents types de neige naturelle sur les domaines spectraux du visible et du proche et moyen infrarouge en tenant compte des différents paramètres tels que le facteur de taille des grains de neige et la pollution par le carbone-suie. Les auteurs comparent les résultats expérimentaux concernant la réflectance directionnelle hémisphérique de la neige aux valeurs théoriques issues du modèle de Wiscombe et Warren basé sur la diffusion de Mie.

ABSTRACT :

CEN has developed an experimentation in cold laboratory with the purpose of measuring optical parameters of natural snows on the visible and infrared spectral ranges, depending on snow grain size and carbone soot content. Experimental results, especially snow directional hemispherical reflectances, are compared with theoretical values issued from Wiscombe and Warren modelling based on the Mie scattering.

INTRODUCTION :

L'évolution du manteau neigeux dépend fortement de ses échanges avec l'atmosphère, et parmi ceux-ci, le rayonnement solaire constitue souvent sa principale source d'énergie. La connaissance des paramètres optiques de la neige est fondamentale pour faire une évaluation correcte du bilan énergétique du manteau neigeux. Le bon fonctionnement des modèles physiques d'évolution du manteau neigeux, tels "CROCUS" (BRUN et al 1992), dépend donc en partie de la connaissance de ces paramètres optiques eux-mêmes liés aux caractéristiques physiques du type de neige. Des modèles théoriques de calcul de ces paramètres optiques existent (Wiscombe et Warren, 1980) mais, ils reposent généralement sur une représentation sphérique des grains de neige la plupart du temps assez éloignée de la réalité. Des mesures sont d'autre part disponibles, mais présentent un certain nombre de lacunes en ce qui concerne les paramètres physiques des neiges étudiées (formes, tailles, pollution). C'est la raison pour laquelle le CEN a entrepris des mesures expérimentales sur les différents types de neiges naturelles en identifiant leurs caractéristiques physiques.

PRINCIPES THEORIQUES :

Le rayonnement solaire pénètre dans le manteau neigeux et subit à l'intérieur de celui-ci de multiples diffusions provoquées par les grains de neige. Une partie de ce rayonnement est

(1) Centre d'Etudes de la neige, Météo France, 1441 Rue de la piscine, 38406 Saint Martin d'Hères, France.

(2) Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'environnement, CNRS, Université Joseph Fourier, 38402 Saint Martin d'hères, France.

(3) Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Université des sciences et techniques de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq, France.

(4) Centre des Faibles Radioactivités, CNRS/CEA, Avenue de la Terrasse, 91190 Gif/Yvette, France

d'autre part absorbée au cours de la traversée de ces grains de neige et se traduit par leur échauffement. La fraction de rayonnement qui n'est pas absorbée par la neige et qui réémerge à la surface du manteau neigeux à la suite des diffusions successives, constitue le rayonnement rétrodiffusé par la neige vers l'espace.

Pour un domaine spectral $\Delta\lambda$, si $F_{i\Delta\lambda}$ est la valeur du flux incident à l'interface neige / atmosphère, et $F_{r\Delta\lambda}$ celle du flux rétrodiffusé, on peut définir le paramètre de réflectance spectrale :

$$A_{\Delta\lambda} = \frac{F_{r\Delta\lambda}}{F_{i\Delta\lambda}}$$

Ce terme prend différentes appellations suivant que l'on considère le flux incident venant de tout l'hémisphère et le flux rétrodiffusé dans cet hémisphère (réflectance hémisphérique ou albédo), soit un flux incident parallèle suivant une direction et le flux rétrodiffusé dans tout hémisphère (réflectance directionnelle hémisphérique), soit un flux incident parallèle suivant une direction donnée et le flux rétrodiffusé dans une direction donnée (réflectance bidirectionnelle).

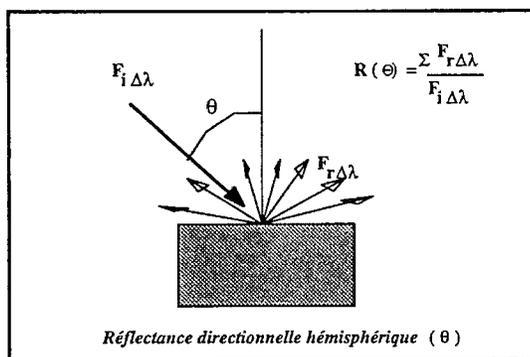


Fig n°1: Schéma de principe de la réflectance directionnelle (θ) hémisphérique

La réflectance, outre les angles d'incidence et de rétrodiffusion pour les réflectances directionnelles et bidirectionnelles, dépend de la longueur d'onde, de la taille des grains, de la pollution (Carbone-suie).

La télédétection spatiale des surfaces enneigées pour l'identification des types de neige de surface est basée sur la mesure des réflectances bidirectionnelles. Pour ce qui est du calcul du bilan énergétique du manteau neigeux, on utilise la réflectance directionnelle hémisphérique (rayonnement solaire direct) et la réflectance hémisphérique ou albédo (rayonnement solaire diffus). Le montage expérimental utilisé au CEN permet de mesurer la réflectance directionnelle hémisphérique.

METHODOLOGIE ET MONTAGE EXPERIMENTAL :

Le montage expérimental (Sergent et al, 1993), est constitué d'une partie physique ou expérimentale située en chambre froide et d'une partie mesure et acquisition à l'extérieur de la chambre froide. La partie expérimentale est conçue pour être en accord avec l'hypothèse de semi-infinité du milieu neige par l'utilisation d'échantillons assez grands placés dans des carottiers à haut pouvoir rétrodiffusant. L'éclairage des échantillons est diffus et la mesure du flux réfléchi

se fait selon la normale à la surface. Selon le principe de réciprocity de Helmholtz, on mesure donc une réflectance directionnelle hémisphérique sous un angle d'incidence $\theta = 0^\circ$ obtenue à partir d'une courbe de calibration calculée avec des étalons de réflectance Lambertiens sur les domaines spectraux étudiés. L'analyse spectrale des flux réfléchis est réalisée à l'aide d'un monochromateur à réseau de diffraction, par pas de 10 nm. La mesure est effectuée par un photomultiplicateur sur le domaine 400/1000 nm et par une cellule à effet photovoltaïque (Ingaas) sur le domaine 800/1600 nm.

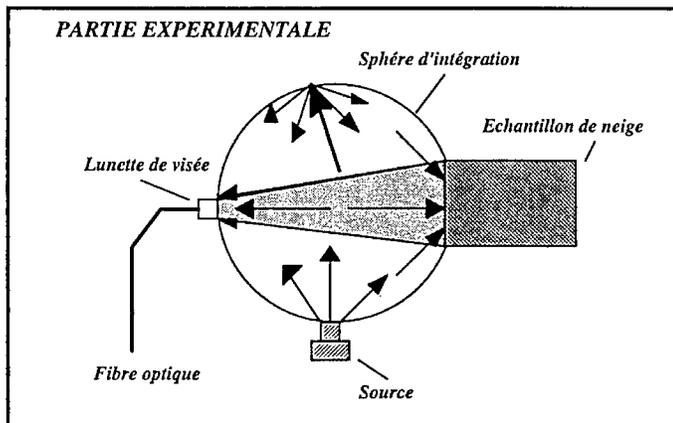


Fig n° 2 : Schéma de la partie expérimentale du banc de mesure

Chaque échantillon de neige expérimenté fait l'objet d'une identification morphologique et d'une mesure de facteur de taille. Cette mesure est réalisée à partir d'images vidéo digitalisées de 50 à 60 grains ou agglomérats de grains choisis au hasard. Le traitement de ces images fournit un certain nombre de paramètres tels que périmètre moyen, surface moyenne, longueur moyenne, rayon convexe moyen, sphéricité moyenne. Pour la comparaison avec les modèles théoriques de réflectance, il nous a semblé que le choix du rayon convexe moyen comme paramètre de taille était le plus approprié.

La pollution, notamment la présence de carbone-suie, altère fortement, suivant sa concentration, la réflectance de la neige sur le domaine du spectre visible (Warren, 1984). Aussi chaque échantillon de neige expérimenté fait l'objet d'une analyse pour doser son contenu en carbone-suie. Cette opération est réalisée au Centre des Faibles Radioactivités de Gif/Yvette (Cachier, 1989).

RESULTATS EXPERIMENTAUX :

Les neiges expérimentées sont soit des neiges prélevées in situ soit des neiges ayant subi une métamorphose provoquée en laboratoire. Parfois, lors de ces transformations, des mesures ont été faites à divers stades de l'évolution. La première configuration du banc de mesure a permis de réaliser environ 80 mesures de réflectance pour des neiges variées sur le domaine spectral 400/1000 nm et, sur le domaine 800/1600 nm 50 échantillons ont été à ce jour analysés.

La modélisation de la réflectance en fonction de la longueur d'onde, selon WW (fig.n° 4), basée sur une représentation sphérique des grains, montre une faible dépendance sur le domaine du visible vis à vis de la taille des grains, mais est très sensible à la concentration en carbone-

sue. Toutefois, au-delà de 900 nm, pour des valeurs de concentration en carbone-sue inférieures à 1 ppmw, seule, la taille des grains a une influence importante. Or, les analyses effectuées ne montrent pas de valeurs de concentration supérieures à 1 ppmw.

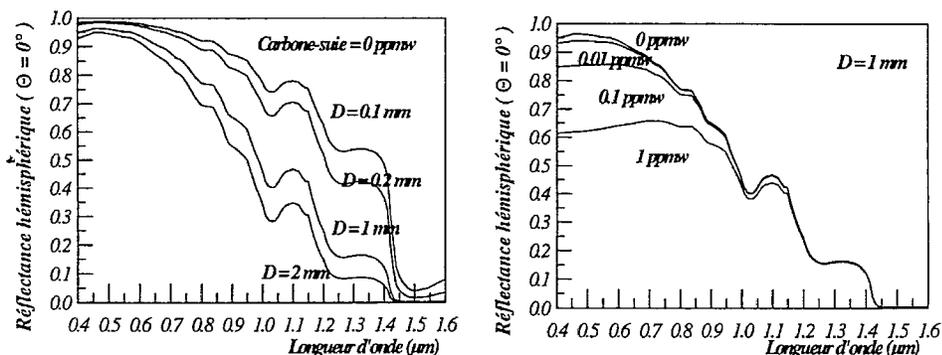


Fig n° 4 : Variation de la réflectance en fonction de la longueur d'onde, pour différents diamètres de grains, et pour différents taux de pollution, selon le modèle de Wiscombe et Warren.

Dés les mesures effectuées sur le domaine 400/1000 nm, il nous est apparu intéressant d'établir une relation entre le diamètre convexe moyen mesuré pour chaque échantillon et le paramètre de taille de la modélisation. Celui-ci, que nous appelons diamètre optique, est défini comme étant le diamètre des sphères de glace donnant une réflectance modélisée égale à celle de la mesure sur un domaine spectral où la pollution par le carbone-sue n'a pas d'effet.

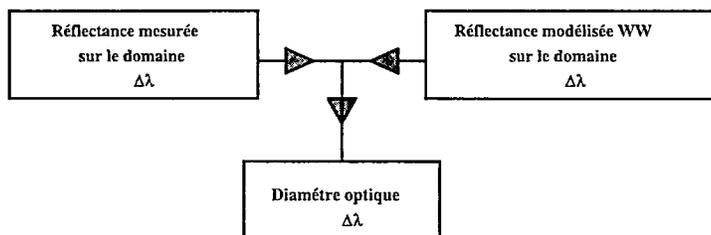


Fig. n° 3 : Principe de détermination des diamètres optiques

Domaine spectral 400/10000 nm :

Sur le domaine 400/1000 nm nous avons utilisé un diamètre optique évalué sur la bande 980/1000 nm, l'influence du carbone sue y étant théoriquement nulle pour des taux inférieurs à 1 ppmw. La comparaison entre les mesures de réflectance pour différents types de neige, identifiées par leurs diamètres optiques et par leurs contenus en carbone-sue, avec les valeurs théoriques selon le modèle WW, montre un assez bon accord (Fig.n°5). Cependant, sur le domaine du visible, les valeurs théoriques sont systématiquement inférieures de 1 à 5% aux

valeurs mesurées. Cela est vraisemblablement dû à la paramétrisation des caractéristiques physiques du carbone suie dans la modélisation, ainsi qu'au type de concentration choisi. En effet, le modèle utilise un mélange interne aux particules de glace, ce qui est plus efficace pour l'absorption. Dans la réalité, le mélange est à la fois interne et externe avec des proportions très variables.

Domaine spectral 800/1600 nm :

Sur ce domaine, nous avons choisi un diamètre optique évalué sur la bande 1290/1310nm en raison de la grande variabilité de la réflectance en fonction du diamètre sur cette partie du spectre (Fig n°4). La comparaison des valeurs de réflectance mesurées, avec les valeurs théoriques, pour différents types de neige (Fig n° 6) montre encore un assez bon accord. Néanmoins, on peut observer des écarts systématiques avec des valeurs théoriques supérieures vers les courtes longueurs d'onde, et inférieures vers les grandes longueurs d'onde. En terme de diamètre optique, ce comportement signifie que le diamètre optique diminue globalement avec l'augmentation de la longueur d'onde. Cela pourrait être expliqué par la diffusion de Mie utilisée dans le modèle ainsi que par les coefficients d'absorption de la glace choisis.

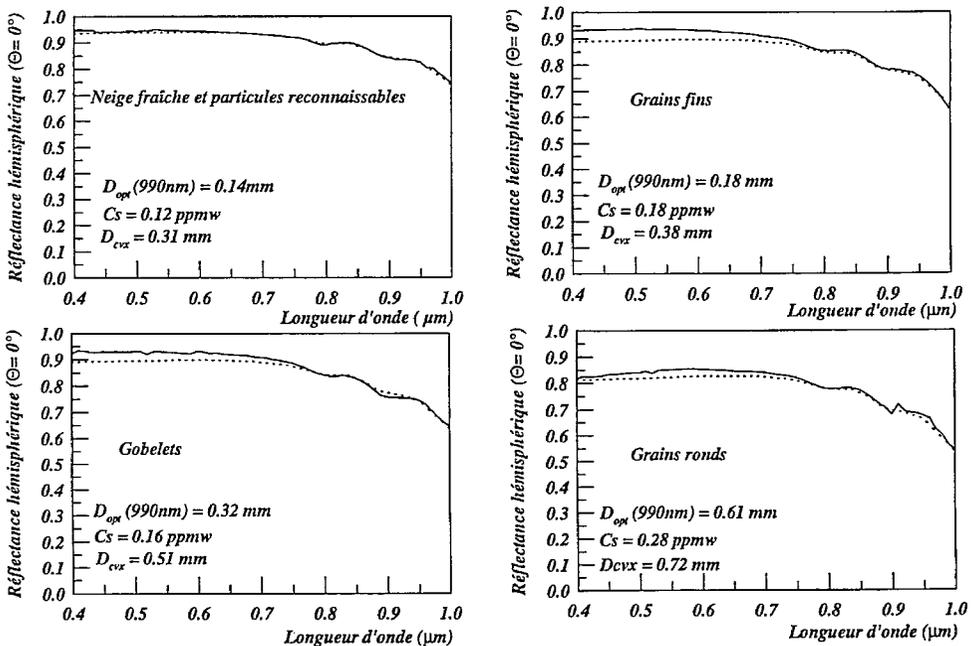


Fig n° 5 : Comparaison des mesures (trait plein) aux valeurs théoriques selon le modèle WW (trait pointillé) pour différents types de neige, en fonction du diamètre optique (990 nm) des grains de l'échantillon, et du taux de concentration en carbone-suie. Le diamètre convexe moyen est donné à titre indicatif.

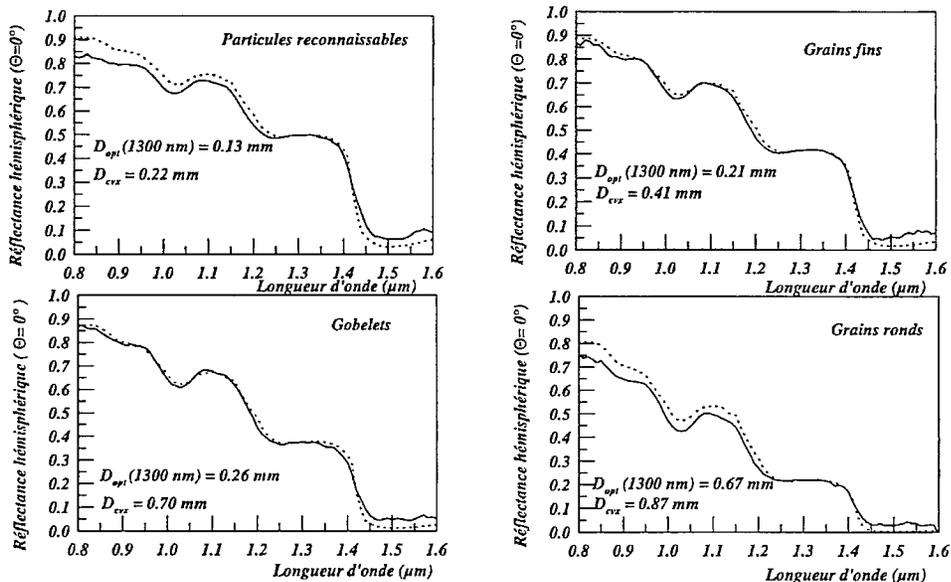


Fig n° 6 : Comparaison des mesures (domaine 0.8/1.6 μm) aux valeurs théoriques selon le modèle WW, pour différents types de neige, en fonction du diamètre optique (1300 nm) des grains de l'échantillon (contenu en carbone suie=0). Le diamètre convexe moyen est donné à titre indicatif.

Influence de la morphologie des grains de neige :

Sur la figure n°7, nous avons essayé de mettre en évidence les comportements optiques des neiges suivant leurs morphologies, à savoir, d'une part, les neiges dendritiques et anguleuses (givre de profondeur et neiges récentes) et d'autre part, les neiges plutôt sphériques (grains fins et grains ronds). Les deux paramètres utilisés représentent la taille physique (diamètre convexe moyen) et le comportement optique (diamètre optique) des différentes neiges expérimentées. Les droites de régression des deux populations qui diffèrent nettement, montrent les comportements spécifiques des deux types de neige, et on peut en outre observer que le grossissement des grains de neige du type anguleux n'a que peu d'impact sur son comportement optique. Par contre, une évolution de ces grains en grains ronds au cours d'une métamorphose liée à l'humidification s'accompagne d'une baisse rapide de la réflectance. En témoignent les diamètres optiques des grains symbolisés par les losanges pleins. Ceux-ci sont des gobelets (triangles sur la droite de régression) ayant été arrondis par humidification.

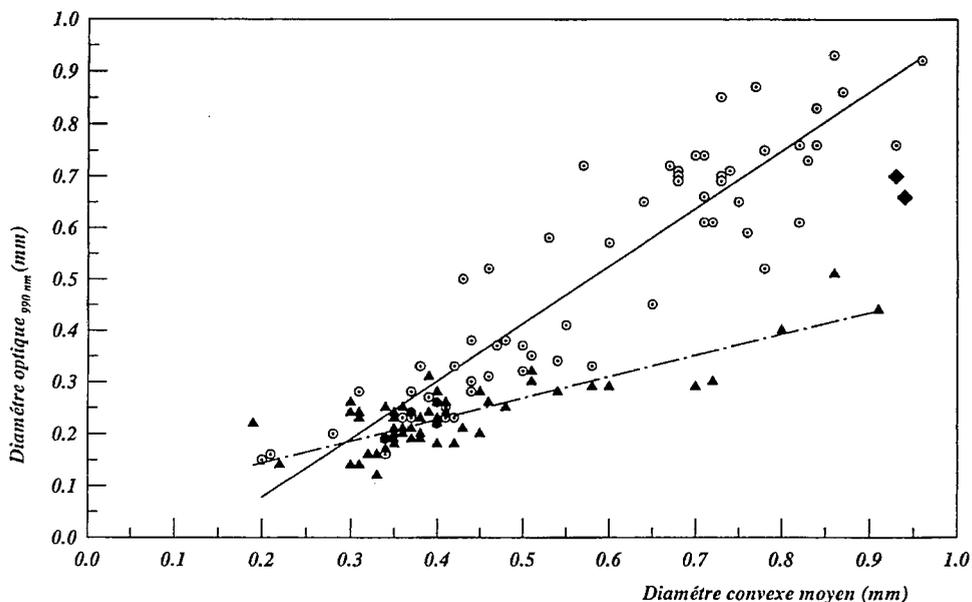


Fig n° 7 : Relation entre les diamètres convexes moyens et les diamètres optiques 990 nm.
 Les symboles ronds représentent les grains du type sphérique, et les symboles triangulaires
 les grains du type anguleux ou dendritique. Les 2 losanges pleins sont des gobelets arrondis.

CONCLUSION :

La comparaison des mesures expérimentales et des valeurs théoriques selon WW, montre des différences que l'on peut espérer atténuer en essayant de mieux paramétriser les caractéristiques physiques et le type d'incorporation du carbone-suie. D'autre part, il faudrait aussi vérifier que le type de diffusion utilisé est approprié, et que les coefficients d'absorption de la glace sont conformes. Le rôle du paramètre de taille n'a pas été abordé dans cet exposé mais, son choix est important et devrait faire l'objet d'une étude particulière avec le recours à des distributions de taille ou des indices de forme.

BIBLIOGRAPHIE

Brun (E.), David (P.), Sudul (M.), Brunot (G.), 1992 - A numerical model to simulate snow cover stratigraphy for operational avalanche forecasting, *J. of Glacio.*, vol 38 n°128, pp13-22.

Sergent (C.), Pougatch (E.), Sudul (M.), Bourdelles (B.), 1993 - Experimental investigation of optical snow properties, *Annals of Glaciol*, vol 17, pp 281-287.

Warren (S.G.), Wiscombe (W.J.), 1980 - A model for the spectral albedo of snow II: Snow containing atmospheric aerosols, *J. Atmos. Sci*, vol 27, pp 2734-2745.

Warren (S.G.), 1984 -Impurities in snow : effects on albedo and snow melt. (review). *Ann. of Glaciol*, 5, 177-179.

Cachier (H), Bremond (MP), Buat-Menard (P), 1989 - Determination of atmospheric soot carbon with a simple thermal method. *Tellus*, 41B, 379-390.

Experimental investigations on the effectiveness of avalanche balloons

Étude expérimentale de l'efficacité des ballons avalanche

F. Tschirky, R. Meister, W. Ammann, O. Buser, W. Caviezel, M. Hiller¹

RESUME

Au cours de l'hiver 1994/95, l'Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches au Weissfluhjoch/Davos a réalisé les premiers essais du ballon avalanche ABS. L'objectif de ces essais était d'examiner si un ballon porté en sac à dos pouvait empêcher efficacement l'ensevelissement d'une personne prise dans une avalanche de plaque de neige. Les tests portaient essentiellement sur un examen de principe du système; les caractéristiques spécifiques au produit tels que la fiabilité technique ou la facilité d'utilisation du sac à dos avalanche ABS figuraient au second plan des expériences.

Pour un total de 3 essais, des mannequins semblables à des skieurs de 65 à 85 kg, avec ou sans ballon avalanche ont été déposés par hélicoptère sur les pentes dangereuses. Ensuite, les avalanches ont été déclenchés artificiellement par explosion. Sur les 18 mannequins utilisés, 11 étaient équipés du ballon avalanche ABS. Les essais ont montré que le ballon avalanche était toujours visible à la surface de la neige après que l'avalanche s'était arrêtée. Les mannequins ABS gisaient cependant souvent à plat ventre sous le ballon et quelques-uns étaient complètement recouverts de neige. En revanche, 6 mannequins sans ballon ABS ont été entièrement ensevelis par l'avalanche.

Sur les 6 avalanches connues à ce jour impliquant un total de 10 personnes équipées du sac à dos ABS, 2 ballons n'ont pas fonctionné pour des raisons humaines ou techniques. Sur les 8 personnes pour lesquelles le ballon avalanche s'est gonflé, 5 n'ont pas été ou ont seulement été partiellement ensevelies; 3 personnes ont été entièrement ensevelies (tête dans la neige, ballon visible à la surface). Dans ces 3 cas, le ballon avalanche ne peut donc pas être considéré comme un appareil de sauvetage. Dans tous les cas connus à ce jour, le ballon ABS était néanmoins un excellent moyen de repérage pour un sauvetage immédiat par les compagnons de randonnée.

Les premiers résultats permettent de conclure provisoirement que le ballon avalanche a des répercussions positives sur la technique de sauvetage. Une défaillance humaine ou parfois aussi une panne technique peut avoir pour fâcheuse conséquence que le ballon ne se gonfle pas au moment voulu. De plus, le ballon ne semble être efficace que tant que la personne avec le ballon sur son dos est emportée par l'avalanche. Ainsi, en cas d'immobilisation dans la zone de dépôt de l'avalanche, le ballon pourrait également être enseveli par de la neige passant au-dessus de lui.

ABSTRACT

The Federal Institute for Snow and Avalanche Research at Weissfluhjoch/Davos carried out preliminary tests with the ABS avalanche balloon in the winter of 1994/95. The objective of these tests was to examine whether a balloon installed in a rucksack could effectively prevent a person from being

¹ Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research (SFISAR), CH-7260 Weissfluhjoch/Davos

buried in a slab avalanche. This primarily involved a basic test on the system. Product-specific characteristics such as technical reliability and easy handling of the ABS avalanche backpack were not the main objective of the tests.

In a total of 3 tests life-size skiing dummies weighing 65 - 85 kg with and without the ABS avalanche balloon were placed by helicopter onto slopes where there was an avalanche risk. The avalanche was then triggered artificially by means of an explosion. Of the 18 dummies used, 11 were equipped with the ABS avalanche balloon. The tests demonstrated that the avalanche balloon, when inflated, would always have been visible at the surface when the avalanche had come to a standstill. However, the ABS dummies were frequently located well below the balloon and some of them were buried in the snow. 6 dummies without ABS balloons were totally buried by the avalanche.

Of the 6 avalanches of which we are aware today involving a total of 10 people equipped with the ABS backpack, 2 balloons did not inflate, due to human error and technical malfunction. Of the 8 people with inflated avalanche balloons 5 people were not buried or only partly covered by snow, 3 people were buried totally (their head was under the snow but the balloons were visible on the surface). In these 3 cases the avalanche balloon could probably not be considered as a rescue device. However, in every single case of which we are aware today it represented a good marker for an immediate rescue by other members of the skiing party.

From these initial results we may draw the conclusion that the avalanche balloon has a positive effect upon technical rescue. However, human error and technical failure can mean that the avalanche balloon may not in fact be inflated at the critical moment. Furthermore, the balloon only appears to be effective as long as the unit consisting of the person and the balloon can flow along with the avalanche. When the balloon comes to a standstill in a deposit area it is still possible for the balloon to be covered by further avalanche-snow.

INTRODUCTION

The avalanche balloon was invented by the German forester Josef Hohenester. He tested 17 balloons in the area of the Zugspitze mountain in the years 1975 - 1979. When calculating the size of the balloon required Josef Hohenester started with the average specific weight of the snow and the weight of a human being and equipment (100 kg). For this reason he initially began his tests using balloons with a volume of 500 litres. He commented (in 1979): „As this complete series of tests illustrates, this calculation was incorrect. Apparently the static lift was far exceeded by the lift produced through the dynamics of the avalanche.“

With this information Hohenester then turned to a balloon volume of just 60 litres for his later tests. In 17 tests all the balloons connected to dummies (dummies weighing 80 - 95 kg, with hinged joints) were held at the surface of the avalanche. The heights of the fracture line of the avalanches triggered artificially were said to be between 0.50 and 4.00 m (Hohenester, 1979).

On 23.3.1978 one of his tests was carried out and documented by the Allianz Technology Centre from Ismaning near Munich (Wolff, 1978). In this test one dummy with a weight of 75 kg and 3 plastic canisters filled with water were used. The size of the balloons involved was 260 litres. Comment: „The explosion triggered an avalanche at an altitude of approx. 2,800 m. After approximately a third of the total travel distance the test objects were reached by the masses of snow and were carried along by it. At an altitude of approx. 2,300 m the avalanche ... finally came to a standstill ... the final positions of the dummy and the plastic canisters were clearly visible through the

bright yellow balloons. Due to the braking effect of its arms and legs the test dummy lay 50 - 100 m above the other test items. While the balloon was lying exposed on the surface of the snow, the dummy was covered by a thin layer of snow.“ (Wolff, 1978).

Hohenester came to the conclusion that a balloon volume of 100 litres (including a safety margin) was sufficient, that the forces occurring between the balloon and the test dummy on the basis of measurements using a rip strip force limiter were always below 7.5 kN and that due to the braking effect described in the Allianz report and caused by the extremities of the test dummy the main effect was to keep the dummy out of the particularly hazardous part of the avalanche (Hohenester, 1979).

THE ABS AVALANCHE BALLOON

Peter Aschauer² from Germany further developed the invention of Josef Hohenester and has been marketing various ABS backpack models since the beginning of the 1990's. His avalanche balloons have an air volume of 150 litres. The balloons installed in rucksacks of various different sizes are triggered when a rip cord is pulled. Pulling this cord releases a cartridge of nitrogen gas which weighs around 380 gr. and is pressurised at 300 bar. When the nitrogen gas escapes at high velocity it draws air from the environment through jets (according to the Venturi system) and fills the balloon, located in an outer pocket on the rucksack and closed by means of cleat clips, with around 150 litres of air within 5 to 6 seconds.

The manufacturer Peter Aschauer also carried out various avalanche tests with his ABS avalanche balloons. Unfortunately these tests were not documented or were only recorded using video tape. According to Aschauer, however, his tests were also successful. - Up to today, around 3,000 ABS rucksacks have been manufactured and sold.

To explain the reason a person with an avalanche balloon of 150 litres in volume moves on top of and not inside an avalanche, two effects must be considered:

1. The mean density of the unit consisting of the person and the inflated balloon is about 400 kg/m^3 (person without ABS balloon: $1,000 \text{ kg/m}^3$).
2. The geometry is changed. The man/balloon unit becomes a large "lump" when compared to the lumps of snow in the avalanche.

Point 1 results in swimming or flying if the surrounding medium, quasi liquid, has a density of more than 400 kg/m^3 . According to the guidelines the density of snow is taken as 300 kg/m^3 in flowing avalanches. For this reason, the first effect alone cannot be considered as a complete explanation.

For the second effect the medium must be considered as a moving granulate. In such cases the grains of different sizes tend to separate, known as segregation. If the large lumps are at the top, this is referred to as inverse segregation.

Inverse size segregation during the movement of a flowing avalanche could mean that the avalanche balloon is located at the surface of the avalanche. The uneven distribution of density between the balloon and the person could however mean that the balloon lies above the person. During phases of acceleration the motional response could be responsible for trajectorial segregation, i.e. a longer braking distance for large particles.

Therefore the effect of the ABS balloon can only be explained by the larger volume of the compound man/balloon and by avalanche dynamic processes and not by buoyancy.

² ABS - Peter Aschauer GmbH, An der Domwiese 3, D-82166 Gräfelfing

KNOWN AND DOCUMENTED AVALANCHE ACCIDENTS WITH ABS BALLOONS

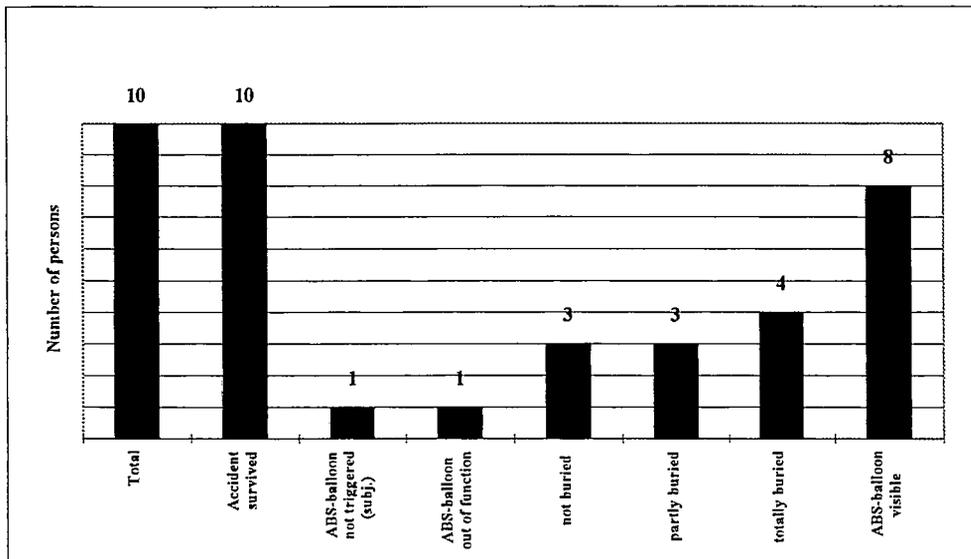


Fig. 1: A graph of documented avalanche accidents with ABS avalanche balloons (as per 16.1.95)

Up to day we know of 6 avalanche accidents in the years from 1991 to 1994, where 10 people equipped with the ABS avalanche balloon were caught by avalanches.

One person who was unable to trigger the avalanche balloon, was totally buried by the avalanche. He was located using a rescue beacon and survived the accident with slight injuries.

In one case the balloon did not inflate due to a technical malfunction. Despite this, the person involved was only partly buried by the avalanche (up to the neck), was dug out by other members of his party and survived the accident with slight injuries.

Of the 8 people for which the ABS system operated correctly, all 8 balloons were visible on the surface of the snow after the avalanche had come to a standstill. 3 of the 8 people were not buried by the avalanche. 2 people were partly buried. Of these 5 people, 2 suffered light injuries and the others were uninjured. 3 people whose ABS operated correctly were totally buried (with their head in the snow) and were unable to free themselves from the snow. Thanks to the brightly coloured avalanche balloon being visible on the surface of the avalanche and the shallow depth at which they were buried these 3 people were immediately located and dug out by the other members of their party. In these cases the avalanche balloon must therefore be considered more as a marker than as a rescue device. One person who was buried completely was slightly injured, the other two were not.

The avalanches involved were of small to medium size with fracture lines heights of between 30 and 90 cm, widths of between 8 and 100 m and lengths of 120 to 750 m. With the exception of one accident (at Gudauri in the Caucasus), all these accidents happened in the Canton of Graubünden, Switzerland.

TESTS WITH THE ABS AVALANCHE BALLOON IN 1995

Because of the success of the balloon in the cases described above and because of the great interest shown by the parties involved (mountain guides, snow safety services, skiers) in getting objective and substantiated statements about the efficiency of avalanche balloons the Federal Institute for Snow and Avalanche Research in Weissfluhjoch/Davos carried out initial tests with the ABS avalanche balloon in the Winter of 1994/95.

These tests involved 3 sections:

- a) Minor preliminary tests
 - Preparation work, suitability tests: Testing techniques, remote triggering of avalanche balloons by radio, comparisons using various dummies equipped with ABS in the avalanche.
 - Initial conclusions concerning the response of the test dummies during the avalanche and the design of the balloon.
- b) Major tests, comparison of dummies with and without avalanche balloons
 - Major tests with several life-size dummies weighing 65 - 85 kg, equipped with skis, on a large avalanche slope, half of the dummies fitted with and half without ABS; positioning the dummies in pairs (one with and one without ABS) at different locations on the slope (near the starting zone, near the end zone); avalanche triggered artificially by an explosion.
 - Examination and comparison of the flow characteristics and the buried depth of dummies with and without an avalanche balloon, taking into consideration their positions when the avalanche was triggered, documenting all avalanche tests through film and photography.
- c) Theoretical investigations
 - Tests with small spherical objects of different density in order to examine the dependency between the buried depth and the density and possibly the size of a body.
 - Support, participation and analysis of the practical tests with dummies in real avalanche situations.

The main objective of the preparation work at the beginning of the winter season was primarily to put together the concept and to obtain the materials required. For this reason six ABS rucksacks were equipped with a radio remote control system. Furthermore, a sufficiently large number of old ski boots, skis, ski sticks and ski suits had to be organised.

Procurement of the dummies for the tests was very costly. It proved almost impossible and extremely expensive to purchase a sufficiently large number of suitable road traffic dummies, with jointed limbs, for the avalanche tests. For this reason much more economically-priced shop dummies made of fibreglass and without jointed limbs were purchased. These hollow dummies had to be filled with sand to bring them up to a weight of between 65 and 85 kg and they were also modified so that it was possible to fit them with ski boots and skis. Of the 18 dummies used, therefore, 15 were modified shop dummies, two were road traffic dummies with jointed limbs and one was a totally flexible test body in the form of a sack.

FIRST PRELIMINARY TEST, ON 4 JANUARY 1995

As a result of the prevailing avalanche conditions a first preliminary test was possible on 4 January 1995 in the Parsenn area of Davos. The prime objective of this was to test the suitability of the modified shop dummies, to practice working with the helicopter and to discover possible problems and errors in the concept to be used for the test. One dummy of approx. 85 kg in weight, without jointed limbs, and equipped with skis was used and an already inflated ABS rucksack was strapped onto it. In all, 4 attempts had to be made until a useful result was obtained: The first avalanche

triggered was too small and the next 2 slopes produced avalanches caused by the helicopter before the dummy could be placed on the slope. Only in the fourth test was it possible to create a medium-sized avalanche which carried the dummy along and buried it. The dummy floated along the surface of the avalanche on its stomach with its head directed towards the valley and only the balloon remained visible. Towards the end of the avalanche the stiff dummy became jammed in the mass of snow while more avalanche-snow flowed down from above to press against the balloon which was on the surface. Due to the high shearing forces involved the balloon together with the valve system was ripped off the rucksack. When the avalanche came to rest the balloon lay in the clear just below the foot of the avalanche. The dummy was buried but partly visible (a hand and a ski stick) and lay approx. 30 m higher up than the balloon. One leg and both arms had been ripped off during the avalanche. The manufacturer of the ABS rucksacks claimed that, because of an error, he had supplied for the tests a rucksack which in fact was only designed for photographic work and on which the securing belts were not sewn as strongly as on the correct rucksack. A subsequent examination and comparison of the seams with other ABS rucksacks confirmed that this statement from the manufacturer was correct.

SECOND PRELIMINARY TEST, ON 8 JANUARY 1995

A further preliminary test took place on 8 January 1995 in the Pischa area of Davos to utilise the prevailing avalanche conditions. The objective of this test was to compare different dummies and to determine any different swimming or floating characteristics of the dummies in an avalanche. Again 1 stiff shop dummy weighing approx. 80 kg, 1 pedestrian dummy with jointed limbs and weighing 75 kg obtained from the automobile industry (both dummies fitted with full skiing gear) and a totally flexible test body in the form of a sack with a weight of approx. 75 kg (without skiing gear) were used. The 3 dummies equipped with already inflated avalanche balloons were placed on an avalanche slope by helicopter. The first explosions were unsuccessful. After the dummies were moved approx. 100 m the third explosion on the same slope generated an avalanche. The dummies were located at the starting zone of the avalanche, which was initially quite small. However, the initial avalanche also caused additional masses of snow to begin moving and so created a medium-sized avalanche. It was good to observe that the brightly coloured avalanche balloons were mostly visible on the surface during the avalanche and always reappeared even if they disappeared briefly. The unjointed dummy came to rest in a deposit zone on a more level part of the terrain. The two other dummies were carried down to the foot of the slope into a pronounced depression. Further avalanche-snow buried all the 3 dummies completely and even the balloons were buried by the avalanche to between 30% and 70%. However, when the avalanche came to rest all three balloons were clearly visible, even from a greater distance. When the dummies were dug out it was found that their heads had been buried to a depth of up to 1.00 m and that at the location of the dummies the avalanche itself was between 1.50 and 2.00 m in depth. It is thus easily conceivable that further masses of snow flowing down the slope could have buried the balloons completely. The avalanche was approx. 300 m long, 100 m wide and had an average starting height of 0.5 m. No statements could be made about the swimming or floating characteristics of the different types of dummies.

THIRD TEST (MAJOR TEST), ON 10 MARCH 1995

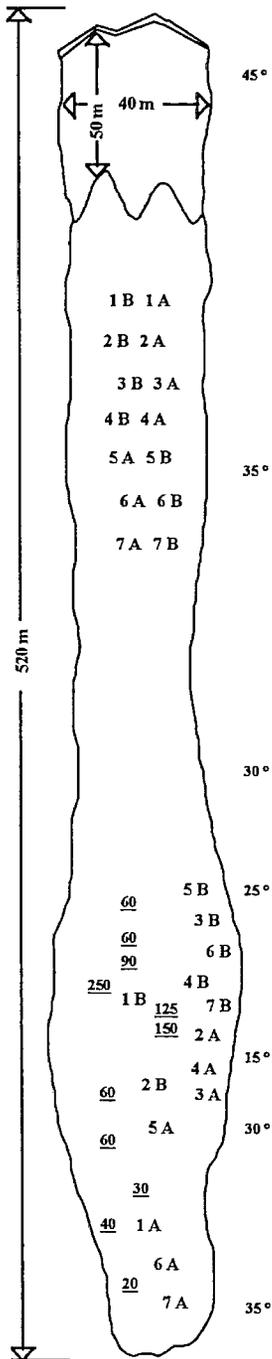
In view of the further stabilising snow cover and the spring weather as forecast, it was decided that a large-scale test would be carried out in the area of Davos despite the only slight risk of avalanche. In total 14 dummies were used, 13 unjointed shop dummies and one jointed road traffic dummy. 7 dummies had no ABS rucksack, 6 dummies had remotely-controlled ABS avalanche balloons and 1

dummy had a balloon which was already inflated. Around 15 members of SFISAR staff, approximately 30 other people (explosives specialists, photographers, a TV team, various visitors, helpers, etc.) and 3 helicopters were involved in these large-scale test. After reconnaissance flights and test explosions a steep gully on the north flank of the Rosställispitz mountain in the Vereinal valley was chosen for the test. The 14 dummies were placed in pairs (1 dummy with and 1 without the ABS avalanche balloon) in the gully and below it, over a distance of approx. 250 m (the spacing between individual pairs was approx. 30 m). With 25 kg of explosives it was possible to create a medium-sized avalanche with a volume of approx. 1,500 m³. All dummies were caught in the avalanche and carried along with it. The 6 remotely-controlled ABS balloons were triggered by radio. Unfortunately the avalanche did not reach its anticipated size and therefore no pronounced deposit areas were produced. The final depth in the cone of the avalanche near the dummies was measured as between 0.20 and 2.50 m. - The observations are:

- All inflated avalanche balloons were visible on the surface of the avalanche
- One avalanche balloon had not inflated (technical malfunction), the dummy was nevertheless only partly buried
- One avalanche balloon was only half inflated
- One hip belt on an ABS rucksack was half torn off
- 4 dummies with balloons inflated (and with their heads in the snow) were buried completely and lying on their stomach under the balloon
- 6 dummies without ABS balloons were buried completely; 4 dummies had to be located using the avalanche rescue beacons; in the case of 2 dummies a ski stick was poking out of the snow. The burial depth (of the head) was between 20 and 80 cm.
- With the exception of the dummy with the half inflated balloon all other dummies with ABS were carried further down by the avalanche than were the dummies without ABS.



Fig. 2: Test dummy with ABS balloon on the avalanche deposit



Summary sketch

Rupture line:

- Coordinates: 795 140 / 185 260
2'800 m a.s.l.
- Aspect: north
- Length: ~110 m
- Rupture height: ~0.10 - 0.93 m
(mean: ~0.50 m)
- Slope angle: ~45°
- Volume: ~1'500 m³

Legend:

- 1 A - 7 A **Dummies with ABS-balloon**
- 1 B - 7 B **Dummies without ABS-balloon**
- 20 - 250 **Measured deposition depths in the avalanche runout zone**

Results:

- 1 A pb
- 2 A tb / vi **Balloon partly blown up; cartridge in function**
- 3 A tb / vi
- 4 A tb / vi
- 5 A pb **Ballon without filled air, cartridge slightly scratched, not triggered**
- 6 A tb / vi **Strap of the backpack partly snapped**
- 7 A nb

- 1 B tb / 80 cm RB
- 2 B tb / 20 cm RB
- 3 B tb / vi (ski pole)
- 4 B tb / 30 cm RB
- 5 B tb / vi (ski pole)
- 6 B pb
- 7 B tb / 50 cm RB

Abbreviations:

- nb Dummy not buried; whole body on snow surface
- pb Dummy partly buried; head however not buried
- tb Dummy totally or main part buried; head totally buried
- vi Dummy found by visible parts (ABS-balloon, ski pole) or visible body parts
- 20 - 80 cm Burial depth of the totally buried dummies (without ABS-balloon / with rescue beacons)
- RB Dummies found with avalanche rescue beacons

Fig. 3: Summary sketch, avalanche at the Rosställispitz, major test on 10.3.1995

CONCLUSIONS

With the information available today the ABS avalanche balloon appears in many cases able to fulfil its purpose of not being buried at all or being buried only partly. Even when the person is buried completely there is a high probability that at least part of the balloon will be visible in the snow and this would therefore allow the person buried to be located and assisted without delay. On the other hand it must be pointed out that human error and technical malfunction can reduce or prevent the proposed effect of the ABS balloon. The limits of effectiveness of ABS avalanche balloons (deep depressions, avalanche deposit areas, major avalanches) could not yet be clarified satisfactorily.

For these reasons and as it is to be hoped that the manufacturer will optimise the ABS system through a number of conceivable technical improvements and that in future comparable products will be developed and made available, further tests with the avalanche balloon are needed urgently.

ACKNOWLEDGMENTS

Financial support for these expensive tests proved extraordinarily difficult to obtain. The Swiss air rescue service REGA and the Swiss Army each provided a helicopter for the large-scale test and the Swiss accident insurance institution SUVA made a financial contribution towards the tests.

Furthermore there were other interested organisations and persons who contributed to the tests.

REFERENCES

- Hohenester (J.), 1979 - *Lawinenrettungsballon - Rettungshilfe, Tagungsbericht „Tagung Elektronik und Lawinen 24. - 28. 4. 1979“ Graz, Austria, (S. 368 - 370),*
Institut für Elektronik der Technischen Universität in Graz
- Wolff (H.), 1978 - *Lawinenrettungsgerät, Untersuchungsbericht Nr. EP 018-77 vom 8. 6. 1978,*
Allianz Zentrum für Technik GmbH, Ismaning b. München

Skier triggered slab avalanche release - some practical implications - *Déclenchement des avalanches de plaques par les skieurs : quelques implications pratiques*

J. Schweizer, C. Camponovo, C. Fierz, P. M.B. Föhn¹

ABSTRACT

To understand the release of dry snow slab avalanches triggered by skiers is crucial for regional avalanche forecasting services as well as for the backcountry skier. Numerous observations of fracture line profiles (at the margin of natural/artificial avalanches or at Rutschblock test sites), Finite Element (FE) calculations and field experiments were performed to get insight in the release mechanism of slab avalanches triggered by skiers.

The skiers impact on the snow cover was measured with load cells at different depths within the snow cover for various snow conditions. Different steps of dynamic loading were considered. As in the previously performed FE-calculations, besides the depth of the weak layer or interface, the sublayering proved to be most important. Hard layers play an important role. Depending on the snow cover configuration the skiers impact is of the same order of magnitude as the strength of typical weak layers derived from shear frame measurements. The results corroborate the idea that the skier is able to trigger the slab avalanche, by directly initiating a brittle fracture within a weak layer or interface.

Based on this work the practical implications for the stability evaluation are discussed. In particular the potential and some of the limitations of the Rutschblock test are described.

RÉSUMÉ

Il est de prime importance pour les services de prévision avalanche ainsi que pour le skieur de randonnée de comprendre les mécanismes de déclenchement de plaques de neige seiche par un ou des skieurs. L'analyse de nombreux profils relevés dans les zones de fracture d'avalanches naturelles et accidentelles ainsi que lors de test du bloc glissant, des calculs par éléments finis et des expériences réalisées in situ permettent de mieux comprendre les mécanismes de déclenchement de plaques par le skieur.

L'impact du skieur sur le manteau neigeux a été mesuré à l'aide de jauges de contrainte appropriées en plusieurs profondeurs pour différentes conditions d'enneigement. Les mises sous contrainte passent progressivement de statiques à dynamiques. Comme l'avaient montré les calculs par éléments finis, outre la profondeur de la couche ou de l'interface faible, la stratification joue un rôle prédominant et en particulier des couches dures. Suivant les conditions d'enneigement, l'impact de skieur est comparable à la résistance au cisaillement mesurée avec un cadre de cisaillement pour les couches faibles typiques. Ces résultats confirment donc l'idée que le skieur est à même de déclencher une plaque en provoquant directement une fracture cassante au sein de la couche ou de l'interface faible.

En nous basant sur les résultats de ces travaux, nous discutons des conséquences pratiques pour l'évaluation de critères de stabilité et en particulier des points forts et des certaines faiblesses du test du bloc glissant.

¹ Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, CH-7260 Weissfluhjoch/Davos, Switzerland. phone: +41 81 417 0222, fax: +41 81 417 0220, e-mail: schweizer@slf.ch

INTRODUCTION

During the winter season 1994/95 there were 20 avalanche fatalities in the Swiss Alps; this is less than the 30-year-average of 28 avalanche fatalities. Nearly one third of the fatalities happened within three days at the beginning of the year 1995 (January 3 to 5). From these three days we know about 7 dry snow slab avalanches triggered by skiers (probably many more were triggered without any victims); 12 skiers were caught, 9 were buried and 6 of them were killed; in particular one avalanche in the east of the Swiss Alps, near the Swiss-Austrian border, caused 4 fatalities and on the same day (January 3) 4 skiers were killed nearby in Austria.

On January 3, 1995 a 4-day snowfall period ended and the weather got fine. Within these 4 days the total depth of new snow was about 90 to 120 cm in the northern parts, 30 to 80 cm in the central parts and 10 to 30 cm in the southern parts of the Swiss Alps. Before this snowfall period there was hardly any snow up to 2000 m a.s.l. At 2500 m a.s.l. the average snow depth was about 50 cm; so skiing conditions until end of December were rather bad. The snow cover typically consisted of weak layers of faceted crystals with some crusts in between and on southern slopes also at the surface. According to the new snow depth the avalanche hazard was estimated to be *high* (4) in the northern parts, *considerable* (3) in the more central parts and only *moderate* (2) in the most southern parts (European 5 degree danger scale). Typically all avalanche accidents following the snowfall period happened in the more central or adjacent southern parts of the Swiss Alps where the new snow depth was only moderate and the avalanche hazard considerable (Fig. 1).

What happened? Probably two things; there seems to be a social aspect and a snow cover aspect. First, it might be that due to the avalanche warning people kept out from the regions with a lot of new snow and a high hazard and went skiing in the other regions; secondly, in the regions with only a moderate amount of new snow, the probability for skier triggered slab avalanches is higher than in the regions with a lot of new snow; there, numerous spontaneously released avalanches were observed, the situations stabilized rather fast and finally the weak layers were deep, so that induced forces are small and skier triggering is less probable.

In the regions with only 30 to 50 cm of new snow the conditions for triggering were perfect: a slightly consolidated layer of new snow on a very unfavourable old snow cover with different weak layers. Before the snowfall, skier triggering was not very probable; the layers of faceted crystals were rather cohesionless; skier's forces could not spread out, although in December some Rutschblocks were easily triggered due to a collapse of the basal layers. After the snowfall, the fracture was in most cases within the old snow cover not at the interface between old snow and new snow, probably since the air temperature was relatively high at the beginning of the snowfall and decreased during the storm.

This episode not only shows the importance of studying skier triggering and transfer of the results to practice but also, it confirms the very old rule that winter periods or regions with a snow depth below the long term average are more dangerous regarding skier fatalities than periods or winters with a lot of snow. In the winter season, 1994/95 both sides of the rule were

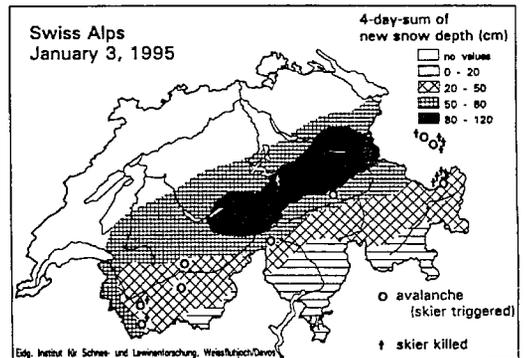


Fig. 1. 4-day-sum of new snow depth at January 3, 1995 and locations where avalanches were triggered by skiers during January 3 to 5, 1995 in the Swiss Alps.

confirmed: 15 of the total 20 fatalities occurred at the beginning of the winter in December and during the first half of January; in the following 4 months there were fortunately only 5 fatalities; the maximum snow depth, in most regions, exceeded the long term average.

Föhn (1987a) introduced the stability index S' considering the skier's effect. As the skier is a substantial additional load, the snow stability may largely decrease when a skier passes (e.g. Schweizer, 1991). Jamieson and Johnston (1995) improved the stability index and tried to use it operationally as forecasting index.

To remember, it is generally believed that slab avalanches start with a shear fracture; so besides steep terrain two requirements must be met for dry snow slab avalanches to occur: a weak layer or interface and an additional shear stress which overcomes the shear strength of the weak layer and which produces a large rate of deformation in the weak layer so that the layer fractures in the brittle way (McClung and Schaerer, 1993).

In the following, we will discuss some results of experiments we have performed to measure the skier's impact and try to come to some conclusions about skier triggering and stability evaluation by Rutschblock tests.

MEASUREMENTS OF THE SKIER'S IMPACT IN THE SNOW COVER

Methods

During the winter season 1993/94 and 94/95 we performed 21 and 22 experiments respectively with load cells (Schweizer et al., 1995) to measure the skier's impact in the snow cover, most of them in the study plot of the Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research (SFISAR) at Weissfluhjoch 2540 m a.s.l.. A few experiments were done on a slope, but as the principal aim was to study the dynamic response of the snow cover, most experiments were performed in flat terrain. For the second period the data acquisition was substantially improved (Camponovo, 1995).

One experiment consists of a series of load steps subsequently performed on the same load cell that was buried or set on the snow surface prior to a snowfall. The different load steps, following the Rutschblock procedure, were: standing atop, weighting and jumping (Föhn, 1987b) (Fig. 2).

For each load step the normal and the shear force were recorded during 20 s with a sampling frequency between 0.7 and 2 kHz. During the experiments the penetration depth and/or the thickness of the snow layer between skier and load cell were measured. Special attention was given to the snow cover conditions: after each set of experiments a snow cover profile was performed, including grain shape, grain size, snow hardness index (hand hardness), snow temperature and snow density (Fig. 4). Whereas during the winter season 1993/94 measurements for different snow cover conditions could be realized showing the substantial effect of the layering, in the winter 1994/95 mostly new snow conditions were found.



Fig. 2. Loading step of jumping; to show the configuration the load cell was partly dug out. The load cell was originally 32 cm below the snow surface, during jumping the distance between skier and load cell reduced to 11 cm. For scale: the load cell's dimension is 50 cm.

This had the advantage that the two possibilities to set a load cell (by cutting out a block or by laying it on the snow surface prior to a snowfall) could be compared. No significant differences could be found provided that there was no thin hard layer or crust in the snow cover.

Results

An example of the measured normal force for the three different loading steps is shown in Fig. 3. The load cell (#3) was laid on the snow surface on February 21, 1995; between February 23 and 27, 82 cm of new snow were recorded in the study plot. Measurements were taken on March 1, 1995; due to settlement the load cell was finally covered with a layer of 48 cm partly fine grained snow (mean density about 180 kg/m^3) (Fig. 4). Sampling frequency was 1.3 kHz. Standing atop produced an additional impact of 110 N (weight of the snow cover and offset: 310 N); the penetration depth was 11 cm; to the end of the load step the skier was standing on one ski only, hence the penetration depth and the normal force slightly increased. In the middle of Fig. 3 the load step of weighting (5 times) is shown, the mean maximal additional normal force is 210 N, the mean peak width is 0.21 s; the penetration depth was 17 cm. Since the new, low density snow (Fig. 4) on top has mainly been compacted just below the ski binding the contact area (ski tracks) got more and more concave, so that there was no more contact just below the binding while standing after the first weightings; hence between the single weightings the value of the additional force of the load step standing atop is no longer reached. This effect is even more pronounced for the load step of jumping (Fig. 3, bottom) where hardly any difference can be seen between standing atop and easing the burden during the jump. Whereas during the several weightings the penetration depth did not significantly increase it increased substantially from jump to jump; accordingly the static load (between the peaks) increases and the peak value increases from 410 N (first jump) to 1150 N (fifth jump); the distance between skier and load cell was finally reduced to 17 cm; the mean peak width is 0.037 s. However, the increase is not only due to the smaller thickness of the overburden layer but also due to a better transmission of the forces due to the compaction.

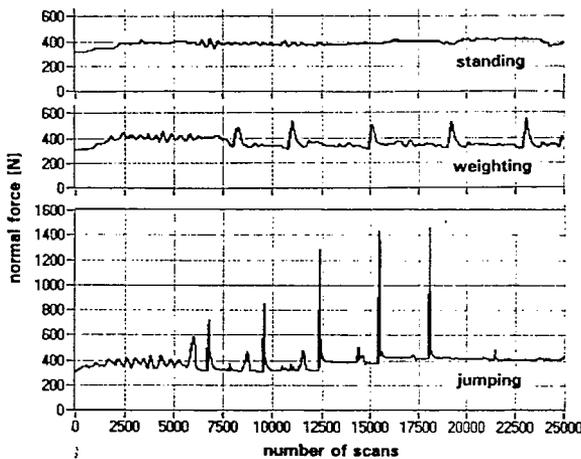


Fig. 3. Normal forces measured within the snow cover due to the skier's impact for the three load steps: standing atop (top), weighting (middle) and jumping (bottom). Sampling frequency is 1.3 kHz, total number of scans on horizontal axis (25'000) corresponds to about 20 seconds. (#3, March 1, 1995)

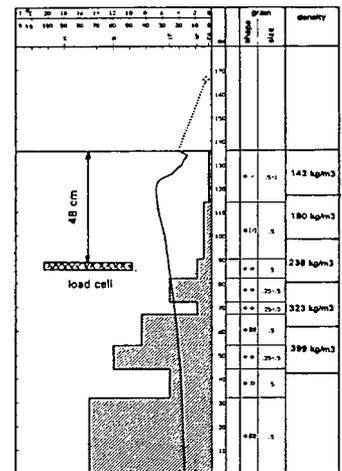


Fig. 4. Snow cover profile at March 1, 1995 in the study plot of SFISAR at Weissfluhjoch 2540 m a.s.l. (total snow depth: 256 cm)

Fig. 5 compiles all results of weighting from the season 1994/95. Snow conditions were quite similar, mostly new snow. Clearly visible is the decrease of the normal force with increasing depth. The solid line represents the calculated impact due to a static line load (assumed to be 500 N/m) on an elastic homogenous one layer snow cover. The difference to a band load of 10 cm is negligible as soon as the depth is greater than about 10cm. The dynamic load step of weighting is best reproducible and seems to correspond to the calculated static load. The difference is probably due to the layering.

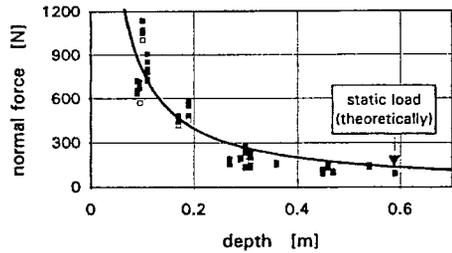


Fig. 5. Measured dynamic (weighting) and calculated static normal force vs. depth below snow surface. Assuming uniform loading of the load cell (area: 0.25 m²) the normal stress would correspond to four times the normal force.

CONCLUSIONS - DISCUSSION OF PRACTICAL IMPLICATIONS

The measurements of the skier's impact in the snow cover showed the substantial dynamic load that the skier represents. The results generally coincide with former FE-calculations (Schweizer, 1993).

A typical value for the additional shear stress (load step of weighting, effective depth about 30 cm, slope angle 30°) is 500 Pa; Föhn (1993) found the shear strength of typical weak layers to be about 500 to 1000 Pa. The value of the additional force and the duration of the peak strongly supports the observation that the skier easily may overcome the shear strength and the critical strain rate to induce brittle failure and fracture of weak layers or interfaces. The damping due to snow compaction (energy dissipation) is less relevant than the dynamic character of the load, but significant differences could be found depending on the sublayering. Hard layers are good transmitters in particular for shear forces; weak layers transmit the forces directly downward, but on a small area and slightly reduced due to snow compaction. Very hard thin layers (i.e. crusts) spread forces at the snow surface; then hardly any impact is measured in deeper layers of the snow cover, i.e. safe skiing in spring time after a clear cold night, when the snow surface could refreeze.

The fact that wind slabs are often triggered is explained by the stiffness of this snow layers (good cohesion); popularly said it is more easy to push and move a slab than a piece of cloth. Since skiing probably best corresponds to the load step of weighting and the weighting to the calculated load due to a line load, the stability index including skier triggering (S') should be a good index. The measurements support the idea to take into account the penetration depth as proposed by Jamieson and Johnston (1995).

Preliminary results from the measurements indicate in accordance with the calculations that the areal impact is generally small, probably at the most one meter around the area the skier influences at the snow surface. However, this does not mean that distances (10 to 20 m) from skier to skier are ineffective, since it is not yet clear how far the repeated load within several seconds weakens the snow cover and what the time of relaxation is.

It is definitely clear and should be well known that the skier's impact decreases with increasing depth, i.e. the closer a weak layer or interface to the snow surface the easier the release. So generally the shallower the snow pack, the more probable is skier triggering; first reason: see above, second reason: weak snow layers are usually more often found in shallow snow covers. This explains why trigger points quite often can be found to the edge of a slope or around rocks. Visible rocks on slopes do not indicate stability. Furthermore, this means that windward

slopes usually are relatively dangerous, in particular some days after a storm. Does this finally mean that the old rule to rather climb and ski ridges than concave slopes or bowls is wrong? No, if the risk of being buried under large snow masses is also considered.

Rutschblock test

Although the spatial variability of the snow cover reduces the validity of any stability test and turns the interpretation into a difficult task of extrapolation, stability tests present a lot of useful information, e.g. does a weak layer exist. Digging is still a necessity in stability evaluation. However, whereas the presence of a weak layer is a definite sign of instability, the absence of it in a snow profile or stability test does not imply that skiing in the area is everywhere safe. The result of a stability test is important, but it is always only part of the whole procedure of stability and risk assessment.

As difficult as the interpretation is the choice of the test site. It is generally said that the site should be representative for the slopes considered to be the most dangerous in the area. But first of all, the place should be safe, i.e. that the risk and the consequences of burial has to be estimated. Some points to consider: the slope should be small (slope angle at least 30°, rather about 35°), should look homogenous and undisturbed and should not be above rocks; it should not be convex (in the line of fall), but rather uniform or concave and there should not be a terrain depression below the slope so that a large burial depth is rather unlikely. The snow depth at the test site should be rather small to have easy triggering (see above). Test sites just below ridges are mostly not representative as due to wind effects (cornice formation) near the ridge the snow cover is often thicker and better consolidated than further downslope.

The measurements showed that the scale of loading (standing, weighting, jumping) is reasonable and represents a continuous, non linear increase of the additional load. Repeated weighting (e.g. three times) does not increase the load, but, it probably makes sense to ensure the correct performance, and, it might progressively weaken the snow cover, the repeated jumping substantially increases the impact, in particular if the surface layers may easily be compacted.

In general, it is not necessary to emphasize the degree of release in complete detail (e.g. release after second or third weighting), but more attention should be given to the type of release (whole block or only parts of it, most of the time only below skis) and the quality (significant sliding plane, type of snow crystals) of the weak layer or interface. These results are important for the stability evaluation. The fact that not the whole block is triggered indicates that the conditions for a shear failure are not very favourable. If the weak layer or interface is near the surface a correct performance (load in shear) is usually not possible and accordingly the test result is not reliable. If the weak layer or interface is deep down in the snow cover the cohesion of the overlaying snow has to be taken into account for the stability evaluation.

To get a good result, in particular to ensure a proper test in shear, the skier loading the block should stand only about 20 to 30 cm below the upper wall of the block, since the maximum additional force is 10 to 30 cm below the skier's position. To enable the correct performance we prefer the Rutschblock to the wedge (Rutschkeil).

The measurements and the calculations indicate that the influence of the slope angle on the test result is insignificant for practical applications, i.e. that an increase of 10° in slope angle could reduce the Rutschblock result by one degree at the most, in accordance with the Canadian results (Jamieson and Johnston, 1993). However, the strong non-linearity of the Rutschblock scale makes any kind of rule doubtful.

REFERENCES

- Camponovo (Ch.), 1995 (unpublished) - *Measurements of the skier's impact in the snow cover*, Diploma thesis, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, April 1995, 135 p.

- Föhn (P.M.B.), 1987a - The stability index and various triggering mechanism. *IAHS Publication*, 162, pp. 195-214.
- Föhn (P.M.B.), 1987b - The Rutschblock as a practical tool for slope stability evaluation. *IAHS Publication*, 162, pp. 223-228.
- Föhn (P.M.B.), 1993 - Characteristics of weak snow layers or interfaces. In: *Proc. Int. Snow Science Workshop*, Breckenridge, Colorado, U.S.A., October 4-8, 1992, pp. 160-170.
- Jamieson (J.B.) and Johnston (C.D.), 1993 - Rutschblock precision, technique variations and limitations. *Journal of Glaciology*, 39 (133), pp. 666-674.
- Jamieson (J.B.) and Johnston (C.D.), 1995 - Monitoring a shear frame stability index and skier triggered avalanches involving persistent snow-pack weaknesses. In: *Proc. Int. Snow Science Workshop*, Snowbird, Utah, U.S.A., October 30 - November 3, 1994, pp. 14-21.
- McClung (D.M.) and Schaerer (P.), 1993 - *The Avalanche Handbook*. The Mountaineers, Seattle, Washington, U.S.A., 271 p.
- Schweizer (J.), 1991 - Dry snow slab avalanches triggered by skiers. In: *Proc. Int. Snow Science Workshop*, Bigfork, Montana, U.S.A., 9-13 October 1990, pp. 307-309.
- Schweizer (J.), 1993 - The influence of the layered character of the snow cover on the triggering of slab avalanches. *Annals of Glaciology*, 18, pp. 193-198.
- Schweizer (J.), Schneebeli (M.), Fierz (Ch.) and Föhn (P.M.B.), 1995 - Snow mechanics and avalanche formation: Field experiments on the dynamic response of the snow cover. *Surveys in Geophysics* (in press).

The effects of temperature on fracture of dry alpine snow

Les effets de la température sur le processus de fracturation dans la neige sèche

D.M. Mc Clung¹

RÉSUMÉ

Les températures de la neige ont des influences importantes sur la stabilité des plaques de neige et le potentiel de propager les fractures de cisaillement. Une partie de l'influence concerne la métamorphose et la formation des liens. Cependant, dans cette communication, je considère les effets de température sur le processus de fracturation. Deux échelles de fracturation sont discutées: 1) les fractures à échelle micro des liens individuels ou les chaînes de liens qui mène à une fracture progressive et un comportement qui assouplit les tensions, et puis 2) les fractures à partir des imperfections à grande échelle qui subissent déjà le l'assouplissement des tensions dans les zones de fracture des couches faibles dessous les plaques de neige. Une version plus complète de cette communication peut être trouver dans McClung (1995).

ABSTRACT

Snow temperatures have important influences on snow slab stability and potential for propagating shear fractures. Part of the influence is with respect to metamorphism and bond formation. However, in this paper I consider temperature effects on fracture processes. Two scales of fracture are discussed: (1) micro-scale fractures of individual bonds or chains of bonds leading to progressive fracture and strain-softening behaviour and (2) fracture from large scale imperfections already undergoing strain-softening in failure zones of weak layers underneath snow slabs. A more complete version of this paper may be found in McClung (1995).

INTRODUCTION

From field experience perhaps the most obvious influence of snow temperature (excluding temperature gradients) on snow slab stability is that warmer snow temperatures increase the rate of bond formation so strength increases occur to increase stability with time. However, there is another aspect of snow temperature on snow slab stability: the effect of temperature on fracture processes and strength. Fracture processes in avalanche formation may be influenced by snow temperatures on at least two scales: the micro-scale (fracture of individual chains or bonds) and propagation conditions for large scale imperfections. In general, I find that the effects of temperature on fracture at both these scales are opposite to effects generally implied from snow metamorphism: rising slab or weak layer temperatures imply decreased snow slab stability.

¹ Professor, Departments of Civil Engineering and Geography, UBC, Vancouver, B.C. V6T 1Z2
Tel: 604-822-9157; FAX: 604-822-6150

TEMPERATURE INFORMATION FROM FRACTURE LINE STUDIES

Studies of the fracture lines of fallen dry snow slabs always show that the stratigraphy is layered: a thick planar slab over a relatively thinner weak layer (Figure 1). The initial failure is presumed to take place in the weak layer or at the boundary between the slab and weak layer, ultimately resulting in shear fracture propagation and avalanche release. A complete understanding of the effects of temperature on snow slab release demands not only that both the slab and the weak layer (failure process), deformation be considered but the relationship between these two elements must be accounted for as well.

Data on temperature dependence of failure layer temperatures from fracture line field studies were presented by Perla (1976, 1977). These data (Figure 2) indicate that the frequency of snow slab occurrences decreases dramatically as the failure layer temperature decreases. Some caution must be applied to the interpretation of these results. Most slab avalanches are triggered by loading from new snow which also happens preferentially during times when air temperatures (and hence snow temperatures) are relatively warm and the potential for deep new snowfalls is enhanced. During cold spells, the chance of fair weather is higher with less chance of avalanche occurrence. Hence, instead of providing entirely direct information about fracture potential (the focus of this paper) the data may partly reflect meteorological conditions. Nevertheless the data do suggest that increasing failure layer temperature decreases stability (or increases avalanche frequency).

EXPERIMENTAL RESULTS

I performed numerous simple shearing tests on alpine snow at constant temperature and rate of shearing with each of these parameters varied between tests. For more detail about the tests see McClung (1987). The illustrative examples I give here are only a small fraction of the data on which I base my ideas. Figures 3-5 show example test data for similar samples taken from the same snow layer sheared at two different rates: 0.1 mm/min and 0.01 mm/min (strain-rates 10^{-4} to 10^{-5} /s) at temperatures between -2°C and -18°C respectively with sample densities of 310 and 340 kg/m^3 . The strain-rates given represent those for the macroscopic samples: I expect rates in the ice bonds are much higher due to stress concentrations. These data show that the initial sample stiffness (tangent modulus) increased dramatically by a factor of 3 as the temperature decreased from -2°C to -18°C . Another important characteristic revealed by experiments is the peak (failure) stress is nearly temperature independent. The differences in peak stress for the experimental data are minor in the experiments and are easily within the expected spatial variations for the layer in which the samples were taken. Narita (1983) performed tensile tests on snow in the same rate range as my shear tests. His results indicate that peak stress variations have increasing strength as temperature decreases despite wide scatter in the data. My data may also show this effect but the variations due to temperature are comparable to natural strength variations that occur due to spatial variability within the layer from which I take similar samples. The variations in peak stress with temperature are small for shear testing, and a likely conclusion is that the parent material (the ice matrix) fracture properties on the micro-scale control the mechanical properties. I say this because Carter and Michel (1971) determined that the tensile fracture strength of polycrystalline ice is nearly independent of temperature for brittle failures in the temperature range 0°C to -40°C . From these results, if the "strength" of a relatively homogeneous snow sample is represented by progressive brittle micro-fracturing of ice grain-bonds each with

approximately temperature independent fracture stress, then it seems possible that the peak strength of the bulk sample is approximately temperature independent.

The acoustic emission pattern observed during shearing is very sensitive to rate of shearing and temperature. The data in Figures 3-5 illustrate the dependence well. The primary features are: (1) for a rate of shearing of the order of 10^5 /s or slower, acoustic emissions nearly disappear independent of temperature in the range studied (-2°C and -18°C); (2) at 10^4 /s or greater, acoustic emission activity increases by an order of magnitude as temperatures decrease from -2°C to -18°C . One possible interpretation of those effects is given in Fig. 6 (b) if the results of Carter and Michel (1971) are accepted with respect to temperature independence of fracture strength of ice: decreased temperature increases failure toughness accompanied by increasing stiffness, and more acoustic emissions result because the work input is high to achieve failure. For this paper, I define failure toughness as the work to achieve a peak on the stress-strain curve: the area under the stress-strain curve until failure (peak stress). The data also indicate a minimum rate of shearing (10^4 /s in these experiments) before micro-fracturing activity is observed.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF FRACTURE ON THE MICRO-SCALE

The direct simple shearing tests may be interpreted as a progressive fracture of bonds until failure (peak stress) is reached on the stress-strain curve. Individual micro-fractures do not result in catastrophic failure of the sample; instead the remaining (unfailed) bonds absorb the applied load. The laboratory experiments show that the sample has increased effective stiffness (initial slope of the stress-strain curve) and increased failure toughness (area under the stress-strain curve to reach failure) as snow temperatures decrease. Both of these features will tend to make failure and hence, propagating shear fractures more difficult to achieve as slab or weak layer temperatures decrease in agreement with the results in Figure 2. Increased stiffness will make the slab or weak layer more difficult to deform (a necessary condition for failure). Increased failure toughness will make it more difficult (more work input) to achieve failure. A more complete mathematical micro-fracturing model is developed by McClung (1995).

APPLICATION TO MODELS OF SNOW SLAB RELEASE

Having considered snow failure properties on the micro-scale, I now wish to consider the possible effects of temperature on dry snow slab release. Dry snow slabs release by rapidly propagating shear instabilities initiating from a weak layer or weak zone. It is my belief that under conditions of natural snow slab release, the failure process must pass through the range of shearing rates which implies strain-softening for at least some cases. I assume, then, that for failure initiation, alpine snow is a pressure sensitive, dilatant strain-softening material with significant rate and temperature dependence when failed in plane strain simple shear (McClung, 1987).

For the simple schematic (Figure 1), I envision that initial failure takes place within the weak layer or at the boundary between the weak layer and slab based on field evidence. The interpretation about how the failure ultimately becomes a propagating fracture depends also on the properties of the surrounding material (slab). It is evident that the slab and weak layer will act together as a mechanical system: both the slab (taken as non-failing material) and

weak layer deformation (progressing from strain-softening to fracture) must be taken into account to assess snow slab stability.

Given that the slab and weak layer deformations act together as a coupled mechanical system, the previous results from micro-fracturing may be approximately applied. Two interesting cases emerge. First, if warming affects only the slab, the effective slab modulus is reduced and the critical condition for shear fracture propagation is achieved easier: snow slab stability is reduced without the need for the weak layer temperature to be changed (McClung, 1995). A second condition results if both the slab and weak layer are warmed. In this case, decreased failure toughness will result in the weak layer to increase instability over the first case above. However, in this case, increased weak layer temperatures will also increase bond formation and metamorphism rates to work in a direction opposite to that for failure and fracture processes to most likely increase stability.

SUMMARY

Taken together, experimental data imply that increased snow temperatures decrease snow slab stability from the viewpoint of fracture. The main effects are decreasing effective initial modulus and decreasing failure toughness. The usual interpretation that increased snow temperatures decrease peak shear strength is considered less important. A complete mathematical description of these results is given by McClung (1995).

ACKNOWLEDGMENT

The research for this paper was supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) of Canada. I am grateful for NSERC's support of this and other avalanche research in Western Canada. The shear testing was performed at Rogers Pass, Glacier National Park, British Columbia. I am grateful to the staff of Glacier National Park and the Canadian Parks Service for supporting this research.

REFERENCES

- Carter, D. and Michel, B. 1971. Lois et mécanismes de l'apparente fracture de la glace de rivière et de lac. Université Laval, Faculté des Sciences, Département de Génie Civil, Section Mécanique des Glaces, Rapport S-22.
- McClung, D.M. 1987. Mechanics of snow slab failure from a geotechnical perspective in *Avalanche Formation, and Effects* (Proceedings of the Davos Symposium, September 1986). International Assoc. of Hydrological Sci. Publication, 162, pp. 475-508.
- McClung, D.M.. 1995 *The Effects of Temperature on Fracture in Dry Slab Avalanche Release*, for JGR.
- Narita, H. 1983. An experimental study on tensile fracture of snow. *Contributions from the Institute of Low Temperature Science, Series A, No. 132*, pp. 1-37.
- Perla, R.I. 1976. Slab avalanche measurements, in *Proceedings of the 29th Canadian Geotechnical Conference, Vancouver, B.C., Part VII*, pp. 1-15.
- Perla, R.I. 1977. Slab avalanche measurements, *Canadian Geotechnical Journal*, 14(2): 206-213.
- Sinha, N.K., 1984. Intercrystalline cracking, grain-boundary sliding and delayed elasticity at high temperatures, *Journal Materials Science*, Vol. 19, pp. 359-376.

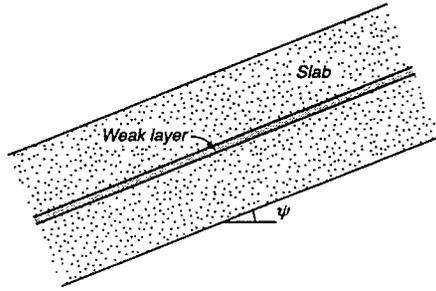


Figure 1: Schematic of layered structure found for slab avalanches. Failure initiates in the weak layer or at the boundary between the weak layer and the slab.

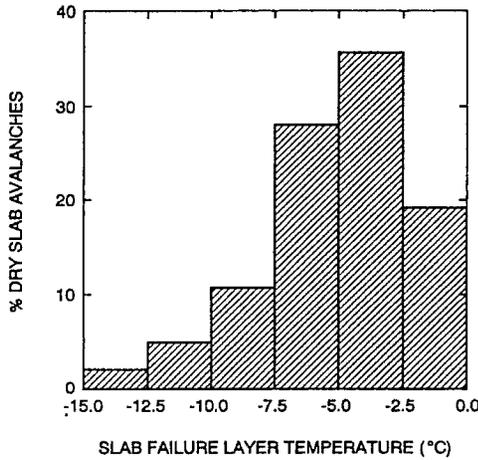


Figure 2: Avalanche frequency histogram as a function of weak layer temperature compiled from avalanche fracture line data compiled by Perla (1976).

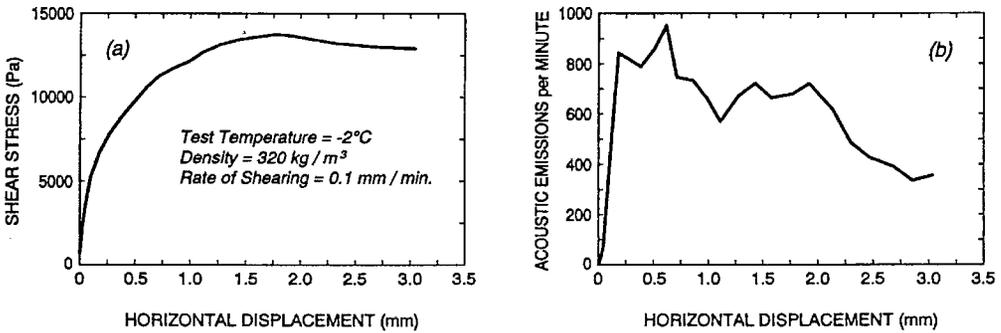


Figure 3: Experimental data for stress-displacement of alpine snow in simple shear (a). Rate of acoustic emissions is shown in (b) during shearing. Faceted dry snow is used in the experiment. Test temperature -2°C .

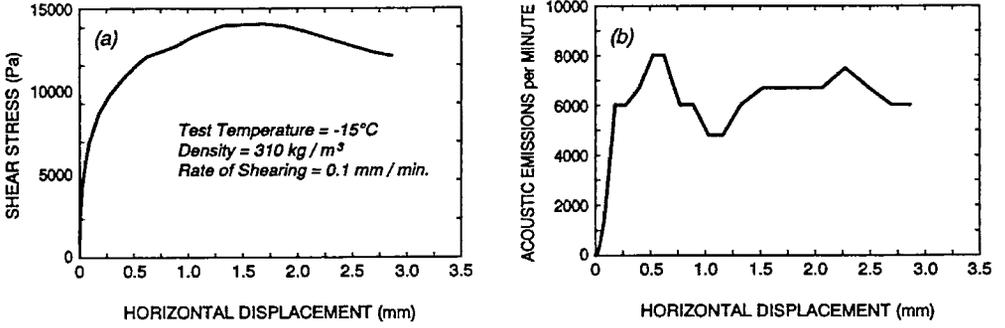


Figure 4: Experimental data for a sample nearly identical to that in Figure 3. Test temperature -15°C. In comparison with Figure 3, the initial stiffness is about 3 times as high, the peak stress is nearly unchanged, the strain at peak stress is nearly unchanged and the number of acoustic emissions is increased by a factor of 10.

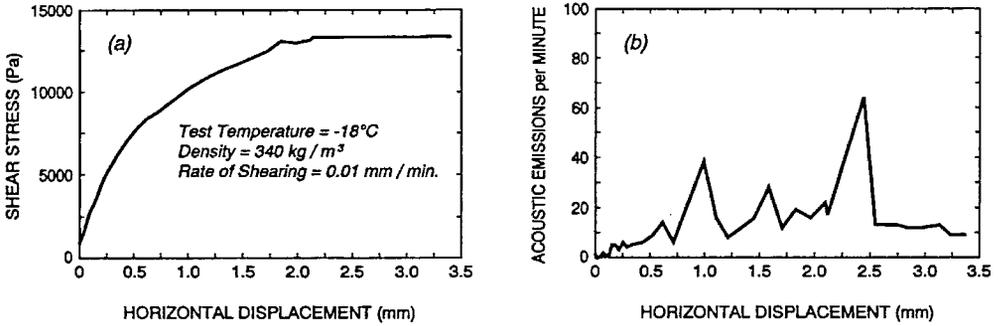


Figure 5: Experimental data for a sample nearly identical to that in Figures 3 and 4. The rate of shearing is lower by a factor of 10 than for Figures 3 and 4. Acoustic emissions are a factor of 10 to 1000 lower and a unique peak (strain-softening) is not observed.

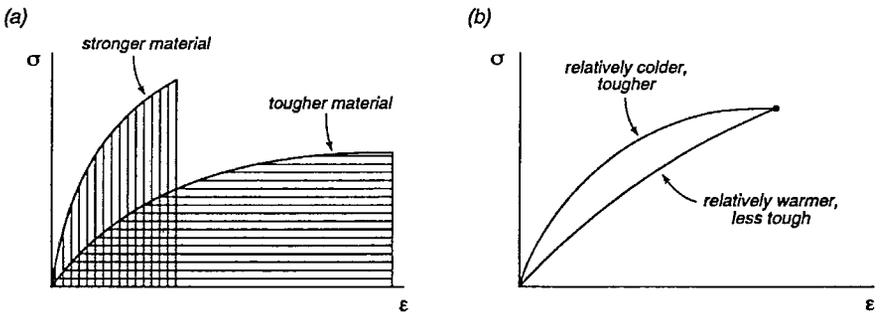


Figure 6: Schematic failure diagrams for stress-strain relating material strength and failure toughness.
 (a) Conventional relationship between strength and toughness. For failure, more work input is required for the tougher material (area under the stress-strain curve increases).
 (b) Assumed approximate relationship for brittle micro-fractures in ice bonds. For colder temperatures, the tangent modulus (material stiffness) is higher and more work is needed to achieve failure.

Évaluation probabiliste de la stabilité du manteau neigeux des pentes de montagne

*Probabilistic evaluation of snow cover stability
on mountain slopes*

P. Chernouss¹

RÉSUMÉ

Sur la base des données de la structure statistique spatiale des paramètres de la couverture de neige (épaisseur, densité, résistance en déplacement) à l'aide de la méthode Monte Carlo des réalisations de la distribution de ces paramètres dans l'espace sont simulées. La stabilité de la couverture de neige pour chaque situation est appréciée à l'aide du modèle déterminé. La probabilité de l'avalanche est appréciée comme la limite de la fréquence normalisée des situations instables.

ABSTRACT

On the basis of data on spatial statistical structure of snow cover parameters (snow thickness, density, shear strength) the realisations of these parameters spatial distributions are simulated by the Monte Carlo method. Snow cover stability for each realisation is evaluated with a deterministic model. The avalanche probability is evaluated as the limit of normalized frequency of unstable situations.

INTRODUCTION

As it is well known, input data for most of substantially detailed avalanche formation models not readily available. The reasons for this are, among other things, the spatial variability of the snow cover thickness, the physical-mechanical characteristics and the difficulty of carrying out necessary measurements at any point of slope.

This work calls attention to a new class of models for snow stability evaluation. The basis of such models are deterministic models of snow cover mechanical equilibrium and the parameters of the models are stochastic functions. Such an approach gives an opportunity to supply the deterministic models with more or less well-grounded input data for any point of the slope.

¹
Anti-avalanche service of JS "Apatit"
50 years of October st., 33 "a", Kirovsk, Murmansk region,
184230, Russia.

Tel +7-815-31-96230

Fax +4778914124, telex 126161 chorr su, E-mail master@apatit.murmansk.su

METHOD

As an example of this class let us consider a model that is used for the evaluation of stability of new snow.

As a deterministic model a simplified Boginsky's model has been chosen [1] in which the comparison of tensile stress with tensile strength is used for evaluation of snow cover stability. For practical use the model was additionally simplified by Boginsky [2] and instead of intensive stress the snow mass of instability zone is used and instead of tensile strength - the value of critical mass. The algorithm of the modeling is described briefly below.

The profile of the slope is divided into the segments with equal length in projection onto the horizontal plane (Fig.1).

For each segment inclination α_k and length Δl_k are calculated.

For each segment slab thickness h_k , density ρ_k and shear strength c_k are given (see below).

For each segment critical slab thickness is calculated with an approximate formula (1).

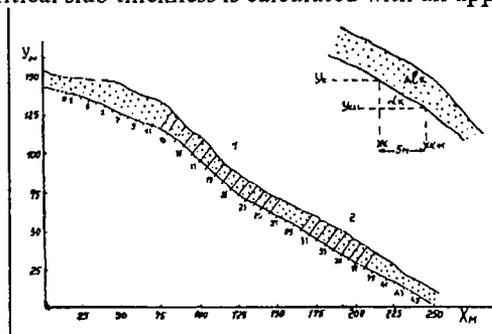


Fig. 1. An example of slope division

$$h_k^* = c_k / \rho_k g (\sin \alpha_k - f \cos \alpha_k) \quad (1)$$

For each segment snow thickness h_k is compared with a critical one h_k^* .

Zones in profile where snow thickness is more then critical one are selected.

Snow masses in selected zones are calculated.

Calculated snow masses M are compared with a critical one M^* for each zone.

It is considered that snow is in unstable conditions in the zones where snow masses are larger than a critical one.

In accordance with [2], the friction coefficient f and a critical mass M^* are effective constants which are determined by back calculation by the data on avalanche releases.

There is a big problem with data of snow parameters for each segment. Usually these parameters are determined in few points of the avalanche starting zone only. As our studies showed [6], two tens of measurements are usually enough for reliable definition of average characteristics only. Spatial changeability of these parameters makes the interpolation between the points of measurements senseless. A statistical modeling method is suggested to obtain the input data for the deterministic models.

To realize the algorithm mentioned above, the parameters' distribution along the profile (obtaining of input data for each segment) was simulated as a multidimensional normal vector ξ . Our studies [3,6] showed that the distribution of the used parameters are very close to normal. Such a distribution is determined by a vector of mathematical expectations m and covariance matrix R . It is very easy to get a vector with such a

distribution by linear transformation (2) of vector η whose components are random values with mathematical expectations equal zero and dispersions equal one.

$$\xi = A\eta + m \quad (2)$$

The transformation matrix coefficients are determined with a special procedure [4] on the basis of the covariance coefficients. For the case with a constant mathematical expectation and dispersion (stationary process), the distances between segments 1 and the autocorrelation function $r(l)$ determine the covariance coefficients entirely (3).

$$R_{ij} = \sigma^2 r(l_{ij}) \quad (3)$$

Where σ^2 is dispersion of snow parameter. So, if we have mathematical expectations, dispersions and autocorrelation functions of the parameters mentioned above, we can produce realizations of their distributions along the profile by Monte Carlo method. Having got a substantial number of realizations, evaluations of two kinds of probabilities P_1 and P_k can be calculated as the ratios of number of a definite kind outcomes to the total number of realizations. P_1 is probability that at least one unstable zone ($M \geq M^*$) is formed in a slope with a given profile (probability of avalanche occurrence) P_k is probability that the snow cover in the segment k is in zone of initial displacement (zone where $M \geq M^*$).

RESULTS

Autocorrelation functions of snowstorm snow thickness $r_h(l)$, density $r_p(l)$ and shear strength $c_p(l)$ were got on the basis of more than 10000 measurements in the Khibini Mountains on the slopes with inclinations of 25-30 degrees. Autocorrelation functions were similar and were approximated by the following expressions¹:

$$r_h(x) = \exp[-0.09 x^{1.50}] \quad (4)$$

$$r_p(x) = \exp[-0.15 x^{0.83}] \quad (5)$$

$$r_c(x) = \exp[-0.16 x^{1.02}] \quad (6)$$

Where x is distance in meters. Since the value of critical mass for deterministic model was obtained by back calculation for one avalanche site only [4], in stochastic model it is chosen by Brier's [5] criteria minimization (7).

$$E = 1/N \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N (P_{ij} - E_{ij}) \quad (7)$$

Where $j=1,2$ - numbers of classes, $j=1$ - avalanche situations, $j=2$ - non-avalanche situations, i - number of situation, P_{ij} - calculated probability of that i -situation relates to j -class, E_{ij} - is equal to 1 or 0 depending on whether i -situation relates to j -class or not, N - total number of situations

¹ Formulas (4)-(6) are not autocorrelation functions for real process $f(x)$ (we have one-dimensional

model), but for process $\varphi(x) = 1/a \int_{x-a/2}^{x+a/2} f(x) dx$, where $a=5m$.

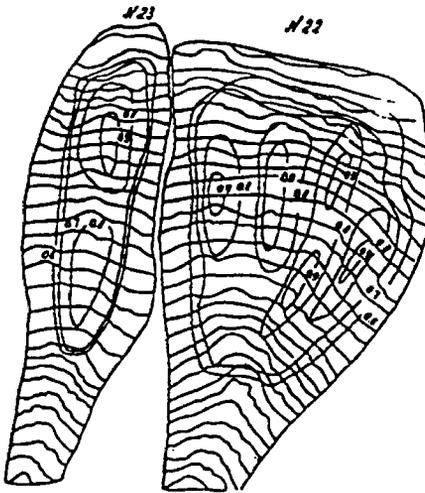


Fig. 2. An example of definition of places with different P_k probabilities. Equal probability lines have been outlined on the map of avalanche starting zones.

In practice, if we have a big avalanche starting zone, calculations for a few profiles can be made. The maps of unstable snow cover conditions received by the results of such calculations (Fig.2) give a rough visual picture of avalanche dangerous zones that are useful in artificial avalanche releasing.

The advantage of such modeling is the adequacy of the results to the input data. Uncertainty in initial information is reflected in a probabilistic conclusion about snow stability. Evidently, it is no sense to use complicated deterministic models if it is impossible to supply them with the required

data. Using the statistical modeling, it is easy to explain differences in quality of avalanche forecasts which were made in different geographical conditions. For example, to consider the spatial autocorrelation function of snow thickness in the Khibini Mountains (Arctic region) and Tien Shan (Middle Asia) (Fig.3) is enough to understand these differences.

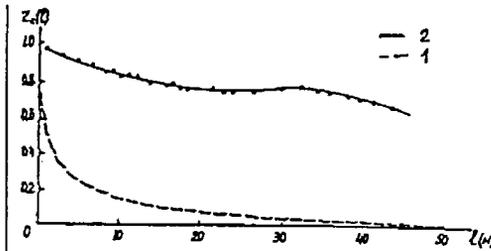


Fig. 3. Spatial autocorrelation of fresh snow shear strength: 1 - for the Khibini Mountains, 2 - for Tien Shan.

Some numerical experiments were carried out to study the parameters h , ρ and c variability influence on the zone unstability formation. The results of these experiments are presented in Figs.4-6. The real profile with the average inclination of 34° and horizontal projection of 170m and ideal smooth one one with such a projection length with inclination of 40° were chosen for the experiments.

In first experiment the dependence P_1 on C_v - coefficients of variability of h , ρ , c parameters was studied. In modelling the mean values m_h , m_ρ , m_c were constant, dispersions of two from three parameters were constant too and the third one was changed. Obviously, the concrete dependences are determined by the profile, values m_h , m_ρ , m_c , σ_h , σ_ρ , σ_c , f , M^* . On the whole, it should be noted, that values P_1 increase with C_v to definite angle of slope, but at big angles values P_1 decrease with C_v increase. So, gentle slopes non-avalanche dangerous in regions with low spatial variability of snow properties, can be avalanche dangerous in regions with high variability of these properties.

The influences of the slope length on P_1 are shown in fig.5. Probability P_1 strongly depends on the length of a slope. It is easy to see that the minimum length of a slope exists on which avalanche release is possible. The valanche formation is impossible on a shorter

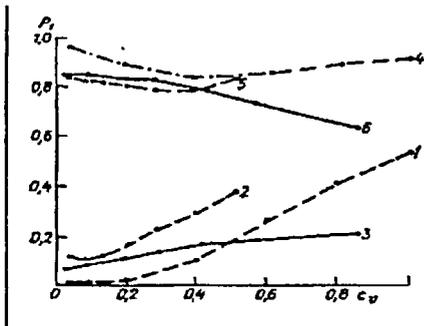


Fig. 4. An example of dependence P_1 from C_v of h , ρ , c - parameters for real profile with average inclination 34° (curves 1, 2, 3 respectively) and for ideal even profile with inclination 40° (curves 4, 5, 6 respectively).

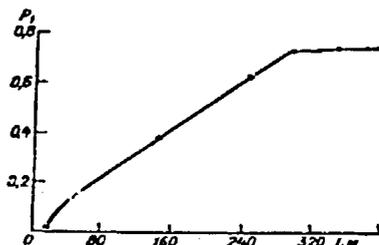


Fig. 5. An example of slope length influence on avalanche release probability P_1 . The slope is smooth and has an inclination of 40° .

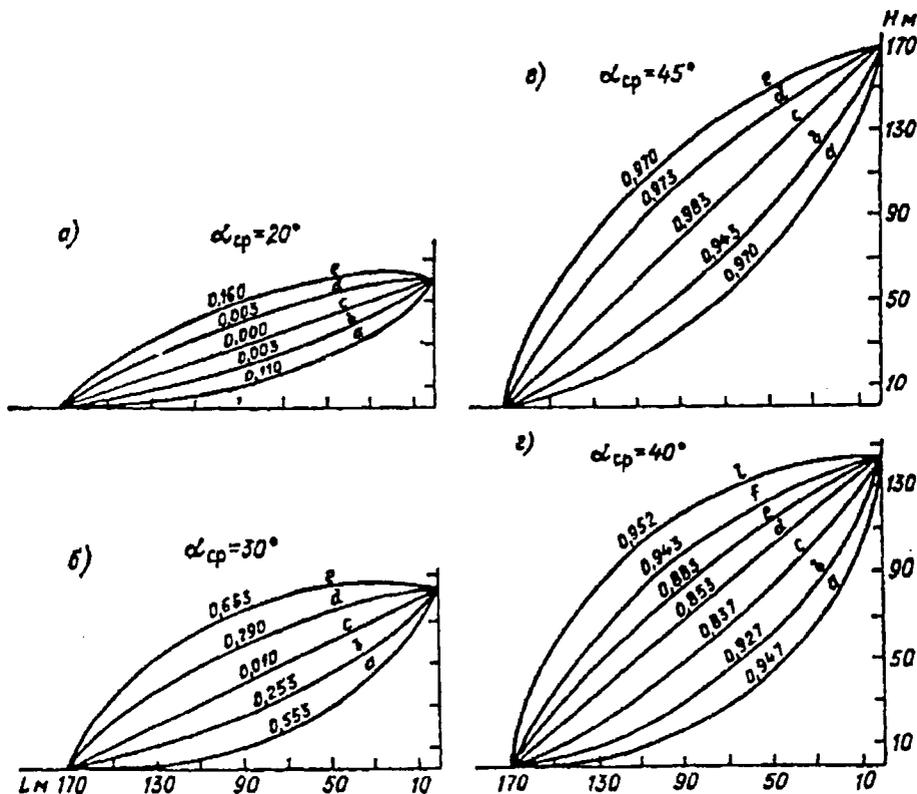


Fig. 6. The influence of longitude profile curvature on formation of snowstorm snow instability zones. Numbers near the profiles are probabilities P_1 .

slope. The minimum length is determined by a set of values $m_h, m_p, m_c, \sigma_h, \sigma_p, \sigma_c, f, M^*$. This conclusion is of important practical application. It is possible to calculate maximum permissible length of slope between terraces at antiavalanche terracing on the basis of long-term measurements h, ρ, c parameters in a given geographical region.

The influence of slope longitudinal curvature on probability P_1 is shown in Fig.6. Fig.6 shows the influence of the average slope inclination on probability P_1 too. At small average angles of slope the longitudinal curvature of profile increases considerably the probability of avalanche release P_1 . The probability of the instability zones formation on convex and concave slopes of identical curvature and with identical average inclination are approximately equal. However on convex slopes the maximal values P_k , corresponded to places of the most frequent avalanche occurrence, are on their bottom parts and on concave - on top ones.

The method is used in the automatical work place of an avalanche forecaster in Anti-avalanche service of JS "Apatit" and permits the forecaster to see the changing of the avalanche release probability in time and in space (within of the avalanche site starting zone).

The forecaster gets a good qualitative picture on the computer monitor and has the opportunity to ask the computer "what will be if values of snow characteristics are changed?"

The considered method of avalanche danger diagnostic with statistical modeling is, in point of fact, detailed large scale avalanche forecast with range of forecast period equal zero. If to use as entrance parameters of the method forecasted value S of snow parameters or extrapolate in time the results of diagnostic it is easily to transform the method in forecast in time.

The improvement of the method will be in using of more complicated deterministic models, in using of the models "trend + random component" for simulation of spatial distributions of snow cover parameters and simulation of stochastic fields as well as in getting of more accurate data on m, σ and $r(l)$.

REFERENCES

1. Boginsky A.N., Grigorian S.S. On equilibrium snow cover in mountain slopes. (In Russian) - Data of glaciological studies., M., 1978, N 34, p.p. 101 - 107.
2. Boginsky A.N. Unstability of natural ice and snow masses in mountain slopes. (In Russian) - The results of science and technics, glaciology., M, 1980, v. 2, VINITI, 122 p.
3. Boginsky A.N., Chernouss P.A. Probability model of snow stability on mountain slopes. (In Russian) - Data of glaciological studies., M., 1986, N 55, p.p. 53 - 61.
4. Yermakov S.M., Mickhailov G.A. Statistical modeling. (In Russian), M., 1982, Nauka, 296 p.
5. Panovsky H.A., Brier G.W. Some applications of statistic to meteorology. Pennsylvania, 1958, University Park, 209 p.
6. Chernouss P.A., Khristoyev Y.V. Accuracy evaluations of the data on snow thickness in avalanche catchments. (In Russian) - Data of glaciological studies., M., 1986, N 55, p.p. 201 - 206.

La neige dans les Andes chiliennes et ses risques naturels

G. Ugarte G.¹

RÉSUMÉ

Le Chili est un pays qui, sur toute sa longueur est délimité par deux grands blocs géographiques. A l'Est la Cordillère des Andes avec 4.227 km de longueur et à l'Ouest, l'Océan Pacifique avec 5.600 km de côtes. Géographiquement le Chili est situé entre le 17ème et le 54ème parallèle latitude Sud avec une largeur moyenne de 250 Km. Malgré sa situation géographique, la Cordillère chilienne est entièrement recouverte de neige avec des sommets dépassant 5.500 m.s.n.m. et culminant jusqu'à 6.893 m d'altitude. Au Sud, bien que la Cordillère descende en pente douce, on observe une certaine régularité du manteau neigeux. En raison de cette particularité le Chili se divise du Nord au Sud en quatre zones avec des qualités de neige absolument différentes. Si l'on analyse les avalanches, il convient aussi de définir les facteurs déterminant suivants :

- *volcanologie ; plus de 5.000 volcans dont 64 en activité ;*
- *des séismes permanents résultant d'effet tectonique et d'une topographie agressive ;*
- *des climats contrastés qui déclenchent des avalanches de grande envergure entraînant des destructions dans les vallées. Aujourd'hui on dénombre environ 2.300 victimes ;*
- *comportement irrégulier de l'isotherme 0°C. Depuis 1982 le plus remarquable a été qu'à plusieurs reprises celui-ci a dépassé les 4.600 m d'altitude, provoquant des avalanches ;*
- *il faut souligner enfin que pour surveiller ces phénomènes au Chili, plus de 45.000 personnes travaillent sur les 3.500 m et quelques groupes à 6.300 m.*

ABSTRACT

Chile is divided in its all length by two massive geographical blocs. With on the East side, the 4.227 km long Andean belt, and on the West side, the Pacific Ocean and its 5.600 km cost. Chile is geographically situated the 17th and the 54th parallel, latitude South and is nearly all along 250 km wide. Despite of its geographical situation, the Andean belt is entirely covered by snow. Tops can reach 5.500 m with some highest points at 6.893 m. In the South, in spite of the soft slope down of the Andian belt, the snow cover maintains a certain regularity. Due to this characteristic, Chile is therefore divided from North to South in four areas of complete different snow texture. Analysing the avalanches, some specific factors have to be pointed out:

- vulcanology : more than 5.000 volcanos, with 64 in activity*
- permanent seisms, resulting from tectonic matters and from an aggressive topography*
- contrasted climates that set in motion important avalanches causing destructions in the valleys. Till the present time 2.300 victims have been registered*
- since 1982, the most spectacular has been the irregular behaviour of the isotherm 0°C that has, at several occasions, overtopped ' 4.600 m altitude causing avalanches.*
- it has finally to be pointed out that in Chile, in order to control those phenomenas more than 45.000 persons are working at 3.500 m and some groups at 6.300 m.*

Gonzalo UGARTE - Vice-président exécutif ETAC S.A. - Professeur : des études des risques naturels (Université Catholique du Chili ; Facultad d'ingenierie ; Ecole Construction Civile)
Adresse : Eduardo Castillo Vicuña 3363 Providencia SANTIAGO DE CHILI
TEL : 2 223 22 40 - FAX 2 204 97 27

INTRODUCTION

En guise d'introduction il me semble intéressant d'ajouter aux causes habituelles de déclenchement d'avalanches d'autres facteurs que l'on rencontre au Chili.

- I La climatologie chilienne
- II Sismotectonique
- III Le comportement de l'homme
- IV Neige et avalanches
- V Les phénomènes de l'isotherme 0°C qui sur une distance de l'ordre de 50 Km s'élève jusqu'à des altitudes inconnues aujourd'hui.

Normalement la Cordillère chilienne est exposée à des déclenchements répétitifs d'avalanches qui provoquent des catastrophes naturelles, qui touchent parfois des lieux habités y compris des villes relativement importantes. Depuis toujours nos catastrophes se sont caractérisées par :

- A un grand volume de masse en mouvement
- B type de cette masse
- C pente propice aux écoulements
- D distance parcourue par l'avalanche depuis son déclenchement et qui en raison de la grande distance parcourue se transforme en laves torrentielles (alluvions)
- E le profil géométrique du lit de l'avalanche
- F de plus, en raison de la situation géographique il est nécessaire de classer les types de neige en autant de groupes qui peuvent se définir par l'altitude, l'ensoleillement et les effets thermiques.

I - CLIMATOLOGIE CHILIENNE

Depuis le Quaternaire le Chili s'est divisé, de façon naturelle, en quatre climats :

Le semi-désertique méditerranéen s'étend jusqu'au 24^{ème} parallèle latitude Sud, il se déplace lentement vers le Sud et se situe actuellement au 31^{ème} parallèle latitude Sud.

Le méditerranéen se situe entre le 31^{ème} et le 36^{ème} parallèle, il se rapproche du 38^{ème} latitude Sud.

Le Tempéré au climat forestier est compris entre le 38 et le 41^{ème} parallèle. A partir de là, l'influence du climat polaire, originaire de l'Antarctique s'accroît et, le régime des pluies s'amenuise en entraînant d'importantes chutes de températures.

Les facteurs qui déterminent le climat sont les suivants :

A - L'océan Pacifique avec deux alternatives complètement opposées.

A1 - le courant froid d'Humboldt de part ses facteurs fait bénéficier au pays des caractéristiques de température d'eau et de stabilité neigeuse.

A2 - Le courant "del niño" d'influence tropicale occasionne des changements violents au niveau de la température de l'eau avec de sévères précipitations (neigeuses) et pluviales.

B - La cordillère des Andes, et ses sommets spectaculaires, (étant donné que nous avons déjà noté que le climat de cette zone était méditerranéen, il présente de ce fait des caractéristiques générales qu'ils est nécessaire d'établir).

Sur les sommets, à près de 5.000 m, il règne un climat glaciaire et en dessous de cette altitude un climat périglaciaire. Ce régime se définit par des procédés qui s'activent en fonction des variations de température, autour de 0°C. La limite inférieure du climat périglaciaire oscille entre les 3.900 et 3.000 m, et diminue en direction du Nord. Il est nécessaire de souligner que cette limite climatique n'a pas fait l'objet d'études très appropriées, il est reconnu d'établir que c'est en ce point précis que l'on enregistre le nombre le plus élevé d'écoulements.

le climat de la Cordillère se caractérise par deux saisons aussi déterminées que distinctes, un hiver froid avec de fortes précipitations, un été sec et chaud la journée, et froid la nuit (-5°C).

Ce phénomène entraîne une gelivation importante au niveau de la roche, il diminue sa taille et augmente son instabilité.

Ces saisons sont extrêmement variables dans le temps et dans l'espace, elles oscillent du Nord au Sud et se chargent de précipitations d'intensités variables. Ces cycles plus ou moins humides ne sont pas très bien établis, il est donc important de les considérer comme facteurs préventifs des pentes "à risque". Selon leur fréquence dans le temps elles peuvent provoquer d'importantes dégradations végétales, mais aussi des fragmentations rocheuses en surface.

D'un autre côté, lors de périodes humides ou durant des périodes de neige, l'eau coule de façon régulière et s'amoncelle en ruisseaux permanents, ce qui entraîne un transport continu des sommets à la vallée.

Les versants se stabilisent de ce fait grâce à l'homométrie des particules des sols, d'une taille légèrement supérieure à celle des torrents de la Cordillère. Cette texture des matériels est un facteur de sécurité pour les pentes encore très inclinées.

II- SISMOTECTONIQUE

Etant donné les nombreuses publications sur le ce sujet je ferai uniquement référence aux séismes présentant les caractéristiques suivantes :

- Le choc des plaques de Nazca contre l'Amérique du Sud entraîne une accumulation d'énergie ce qui favorise les zones de compression qui devront à un moment ou à un autre libérer leur énergie. Il peut dépasser les 8° sur l'échelle de Richter.

- D'un autre côté on trouve le volcanisme quaternaire qui a recouvert la Cordillère d'importantes couches de cendres volcaniques, et également une grande partie des vallées supérieures avec des dalles et des sables volcaniques. Ces cendres sont les responsables de glissements de terrain d'énorme plasticité.

VOLCANOLOGIE

Un cône volcanique couvert de glace, peut éclater en l'espace de quelques secondes et provoquer une avalanche de grande proportion nommée "Lahar".

La chaîne volcanique du Chili, composant de la ligne de feu du Pacifique, a maintenu pendant plusieurs années une activité permanente, c'est une des plus concentrées du monde.

Durant ces dernières années, il a été démontré que le magma avec lequel se sont formés les volcans des Andes, est composé principalement d'une couche "recyclée", ce qui augmente le nombre de matériaux à un certain niveau de décomposition, si on la compare aux Alpes dont la roche est en majorité d'origine granite.

Ce qui signifie que nous remodelons continuellement les conditions de l'équilibre.

III - LE COMPORTEMENT DE L'HOMME

L'homme provoque en permanence plusieurs phénomènes :

1 - **La dégradation du milieu végétal naturel.** La végétation arborescente de la pré-Cordillère est devenue inexistante.

2 - **Les villes s'agrandissent,** et créent de plus en plus de systèmes imperméables et en conséquence l'acheminement des eaux de pluie n'a pas été étudié.

3 - **Sa mémoire défaillante.** Les tragédies s'oublient, les périodes de références peuvent aller de 50 à plusieurs années.

4 - **L'augmentation massive de production de CO2** imperméable à la réfraction des ultra violets la transforme en infra rouges.

IV - NEIGE ET AVALANCHES

Dans le Nord du Chili, jusqu'au 21ème parallèle Sud, l'influence de la neige est tropicale et agit toujours en altitude. Les mois de précipitations sont complètement opposés à l'hiver chilien qui correspond à l'été dans l'hémisphère Sud.

La saison des neiges de la 1ère zone climatique est comprise entre Décembre et Mars, due généralement à l'inversion de fronts tropicaux venus du Nord-Est, et à la hauteur des montagnes sur lesquelles elles se déversent. Cependant, ces fronts arrivent déjà très déchargés, ce qui entraîne des périodes d'ensoleillement intenses avec une importante graduation thermique, d'où une formation de grands cristaux de glace et de "grésil dur".

2ème Zone du 31ème au 38ème parallèle Latitude Sud. C'est une zone très enneigée, qui s'avance en direction du sud, la quantité de neige tombée en 24 heures est de l'ordre de 30 cm à Portillo, et ces périodes de neige sont généralement de longue durée.

Ces durées sont fonction des fronts qui avancent de l'océan Pacifique à l'Est. La cristallisation de la neige est standard, la neige tombée fond rapidement. Plus bas, dans le Sud il se produit l'effet

inverse. De grands glaciers se forment, la neige s'y accumule, dans les vallées encaissées la glace, la neige et les pierres s'entassent. Durant la période d'été, sur les hauteurs, au niveau des glaciers et des surfaces enneigées, des étangs suspendus se forment. De plus, cette zone, formée de cendres volcaniques et de grandes dalles rocheuses est peu stable et accentue les éboulements. En dessous de 3.500 m, la roche se fend en grande partie, dû à la gelivation.

Dans la 3ème zone extrêmement pluvieuse, (60 mm/h à certains endroits), avec un isotherme bas, la neige se maintient sur les sommets de 2.000 m du mois de mars à décembre. Pendant l'été la fonte est accélérée par le soleil et il y a une certaine thermicité produite par les lacs de cette région.

La quatrième zone est uniquement à l'influence polaire, la neige ne s'y accumule pas. Cependant, la glace et le verglas en forment la plus grande partie. Au niveau de la mer, les précipitations sont faibles, par contre c'est une zone très ventée, les bourrasques de neige se déplacent rapidement, la moyenne de la vitesse du vent dans les plaines de la Patagonia oscille entre 60 et 110 Km/h.

V - VARIATIONS RECENTES DE L'ISOTHERME 0°C

Depuis ces dernières années et notamment depuis 1982, dans des zones qui ne dépassent pas les 40 km de large où l'isotherme 0°C a dépassé les 5.070 m, les précipitations ont entraîné des sinistres très importants dans différents secteurs habités* (Ugarte, 1994). Véritables catastrophes naturelles, ces phénomènes se sont déjà produits à 8 reprises depuis 1982, occasionnant des sinistres qui ont coûtés de l'ordre de 10.000.000 USD, dans certains cas pouvant aller jusqu'à 50.000.000 USD.

LE CHILIEN DANS LA CORDILLERE

Aux points de douane entre 4.200 et 3.000 m, 400 fonctionnaires fiscaux sont en poste.

Personnes qui travaillent dans les zones minières :

- à 6.200 m près de 120 personnes sont en poste.
- à 5.000 m près de 1.200 personnes sont en poste.
- à 4.000 m près de 25.000 personnes sont en poste.
- à 3.000 m près de 49.522 personnes sont en poste.

Dû à la longueur du Chili et au relief des Andes, il a été recensé dans une période de 30 ans, 2.312 décès tragiques, causés par des avalanches. Qu'il s'agisse de coulées de boue ou d'alluvions le facteur commun n'en reste pas moins l'écoulement en masse.

En conclusion, le Chili a grand besoin de conseils et d'aide technique des meilleurs spécialistes qui devront tenir compte des différentes caractéristiques nivologiques et géographiques.

BIBLIOGRAPHIE :

- LLIBOUTRY L., 1956 - *Nieves y Glaciares de Chile*, Santiago du Chili, Universidad de Chile 471 p.
- UGARTE G., 1994 - *La Fuerza mayor extraña, por hechos de la naturaleza, puede ser estimada como accidente del trabajo ?* Santiago du Chile, Universidad Catolica, 104 p.

« Prediction of slushflow hazard » Objectives and procedures of an ongoing research project in Rana, North Norway - *Prédictions des écoulements de neige saturée d'eau Objectifs et déroulement d'un projet de recherche en cours à Rana, Norvège du Nord*

E. Hestnes, S. Bakkehoi¹

ABSTRACT

Objective criteria for slushflow prediction and warning are sought. Central objectives are deduction of texture and structure of snowpack from meteorological data and estimation of critical water influx to various snowpack properties and ground conditions.

Two study sites are each monitored by an automatic weather station, precipitation gauge, snow depth sensor and pressure transmitters which record the water level in the snowpack and adjacent brook. The instruments are logged every 10 minutes. Field work is carried out every third week and during extraordinary weather conditions.

A preliminary review of the data shows: i) Four winters of conspicuous differences, including approximately 10 critical weather situations, but only a few minor slushflow periods. ii) Snowpack development clearly reflects the previous winter weather and environmental influences. iii) Texture and structure of snowpack are decisive to slushflow release.

The local Road Department is using the data for supervision of slushflow hazard.

“Prédiction des écoulements de neige saturée” - Objectifs et déroulement d'un projet de recherche en cours à Rana, Norvège du Nord.

RÉSUMÉ

Des critères objectifs sont requis pour la prédiction des écoulements de neige saturée. Les objectifs principaux sont la détermination de la structure et de la texture de la couverture neigeuse d'après les données météorologiques et l'estimation des flux d'eau critique pour différentes propriétés de la neige et du sol.

Deux sites d'étude sont contrôlés par une station météorologique automatique équipée d'une jauge de précipitations, d'une mesure d'épaisseur de la couche de neige, et de capteurs de pression donnant le niveau d'eau dans la couche de neige et le ruisseau voisin. Les capteurs sont interrogés toutes les dix minutes. Des mesures sur site sont effectuées toutes les trois semaines et en cas de conditions météorologiques extraordinaires.

Une première lecture des données montre : i) Quatre hivers sensiblement différents, avec environ dix situations météorologiques critiques, mais seulement quelques périodes d'écoulements mineurs. ii) La formation de la couverture neigeuse reflète clairement les conditions météorologiques de l'hiver précédent et les caractéristiques du site. iii) La texture et la structure de la neige sont des paramètres décisifs pour le déclenchement des écoulements de neige saturée.

Les services de voirie locaux utilisent les données pour la surveillance du danger d'écoulement de neige saturée.

INTRODUCTION

Flowing mixtures of water and snow are a major natural hazard in Norway. They occur in winter due to heavy rainfall, as well as during intense thaw in spring. Numerous terms have been used by scientists and practitioners when describing these phenomena. The participants in the Circum Arctic Slushflow Workshop in Kirovsk, Russia in 1992 decided to recommend the name slushflow when dealing with them.

The Norwegian Geotechnical Institute (NGI) started a research program on slushflows in 1983. The basic interrelations between ground conditions, snowpack properties and water supply, critical to slushflow release and downslope propagation, have been studied (Hestnes 1985, Hestnes & Sandersen 1987, Hestnes et.al. 1987 and 1995). The research has shown that slushflow release is the result of a complex interaction between geomorphic factors, meteorological conditions and snowpack properties, but indicates as well that effective methods for hazard evaluation should be attainable.

Norwegian Geotechnical Institute, P.O.Box 3930 Ullevaal Hageby, N-0806 Oslo, Norway

OBJECTIVES

Prediction of slushflow hazard is the objective of our present program. Objective criteria for slushflow prediction and warning are primarily sought for guiding the society in securing people, constructions and communication lines. The main objectives are:

- Derive criteria for deduction of texture and structure of snowpack from meteorological observations.
- Develop models for meltwater estimation based on meteorological observations and qualitative environmental conditions.
- Identify critical water influx connected to various snowpack properties and ground conditions.
- Test the possibilities of using data from local meteorological stations as a base for estimating critical water influx at potential slushflow sites.

Principle rules for slushflow hazard evaluation will be outlined from the results of these investigations (Hestnes & Bakkehøi 1993).

PROGRAM

Location

Rana, North Norway was chosen for the field program. The frequency of slushflows in the district is high, the historical evidence of slushflow activity is well documented and the Norwegian Meteorological Institute has four meteorological stations in the area (Hestnes & Sandersen 1987). The County Road Authority was also interested in the program and the benefit of having access to data precious to avalanche warning.

Two study sites are established by the starting zones of slushflows critical to the main road between South and North Norway. The sites are 25 km apart, south and north of the town Mo. Deliberately one is by the fjord and the other 15 km inland. The distance between the synoptic weather station and the two sites is 8 and 16 km, respectively, while the precipitation stations are located 8-25 and 7-12 km from the sites.

The starting zones are in small brooks at an elevation of 160 and 210 metres above the road, respectively (Fig. 1-2). One slushflow is released in a natural channel of low gradient in coniferous forest. The other is released on a sloping rock surface on a sparsely forested hillside. The study sites are treeless and have level ground.

Instrumentation and sampling

The field instrumentation shown in figure 3 was put into operation in 1991. A Geonor T-200 precipitation gauge and two Druck pressure transmitters are attached to a digital Aanderaa Automatic Weather station with 18 channels. The power supply has to be replaced every 2-3



Fig. 1 The study site and brook in Illhullia are surrounded by coniferous forest. The water table in the drainage channel is between 1.2 - 1.5 meters, 27.04.1994.



Fig. 2 The slushflows of 27.-28.01.1981 on the sparsely forested hillside in Sjønesheia. Location of study site marked by arrow. The exposed road and railway by the fjord.

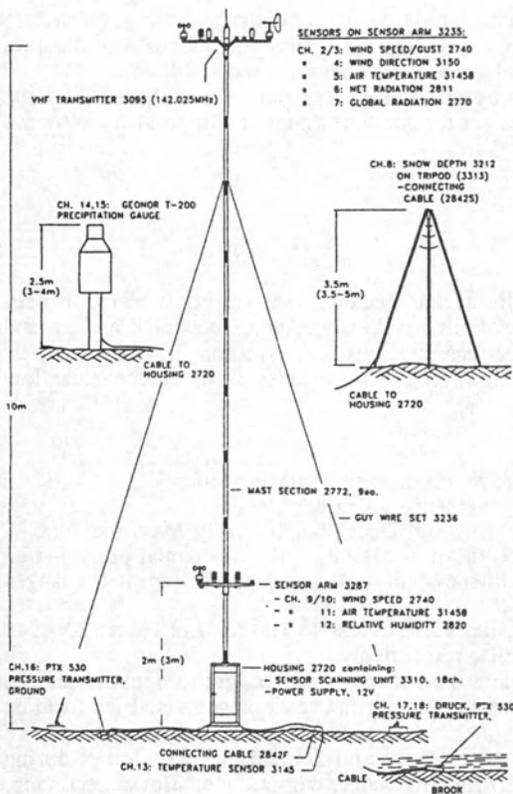


Fig. 3 Instrumentation at the study sites.



Fig. 4 The pressure transmitters are mounted on iron frames for stabilization.

Table 1 The screen view at 1033 a.m. 24.05.1995.

ANDERAA AUTOMATIC WEATHER STATION
Name/Location: Illhullia Date: 24-May-1995

PARAMETER	UNIT	READING 10:33	12 hours 24 hours 144 data-sets.			
			AVR	MAX	MIN	AVR
2 Wind speed 10 m.....	m/s	0.2	0.7	2.4	0.0	0.8
3 Wind gust 10 m.....	m/s	0.6	1.7	4.5	0.0	1.8
4 Wind direction.....	degree	16	102	.....	.....	132
5 Air temperature 10m....	°C	5.1	4.8	13.2	4.1	6.5
6 Net radiation.....	W/m ²	.....	.....	.....	.....	.....
7 Global radiation.....	W/m ²	105	25	615	-30	120
8 Snow depth.....	cm	177.0	178.7	185.0	177.0	180.3
9 Wind speed 2 m.....	m/s	0.4	0.5	1.3	0.0	0.6
10 Wind gust 2 m.....	m/s	0.9	1.8	3.3	0.0	1.5
11 Air temperature 2 m....	°C	3.7	3.9	12.0	2.4	4.5
12 Relative humidity.....	prcnt	93.5	91.0	95.0	28.6	85.4
13 Ground temperature....	°C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14 Precipitation.....	mm	328.6	1.5	T	.....	5.6
15 Water level ground.....	cm	1.9	1.8	2.2	1.1	1.7
16 Water level brook.....	cm	33.2	31.5	33.5	26.2	31.0
18 Water level brook.....	cm	35.3	34.8	35.6	29.1	34.2

M-max T-Total

month. The instruments and their allocation are chosen to give an optimal set of data for the analysis.

The pressure transmitters located on the ground and in the brooks are used for monitoring the fluctuation of water level in the snowpack. The pressure cells are protected against snow load by a brass filter and shield (Fig. 4). The stands of the snow depth sensor and precipitation gauge in Illhullia are at a later date made adjustable, because the snow height during winter may exceed 2.5 metres.

Data scanning is done every 10th minute at both sites to catch the intensity and variations during interesting weather periods. Daily 144 data sets are transmitted from each site and stored in a computer at the local Road Department in Mo. The Road Department is using the data in their avalanche warning program. The records are available at NGI in Oslo as well. A data set is shown in Table 1.

Standard snowpack observations are performed by NGI approximately every third week during winter (Fig. 5). Vertical thin sections are illuminated and studied when the weather and snow conditions are favorable (Fig. 6). There may be additional field trips during periods of rapid changes in the snowpack, i.e. heavy rain and snowmelt. Field assistance and maintenance are cared for by employees at the local Road Department.

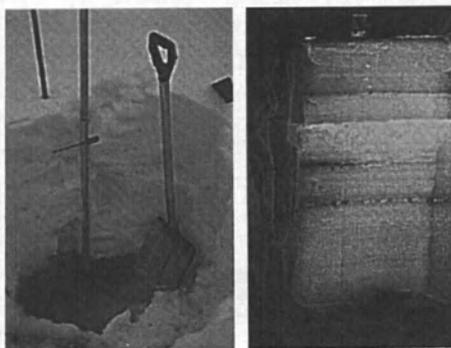


Fig. 5 Snow pit Sjäneshøia, 06.02.1992. Snow height 105 cm. Water level in snowpack 12 cm.

Fig. 6 Snow pit Illhullia, 03.03.1994. Photos of snow profiles have proved helpful in deduction of changes in texture and structure of snowpack during winter.

The interfering geomorphic and vegetational characteristics of the district and study sites are evaluated by interpretation of topographical maps and vegetation survey maps and classification indexes, scale 1:50 000 and 1:5 000 respectively, aerial photographs and field work.

The data files from the local meteorological stations are put at our disposal by the Norwegian Meteorological Institute. Colleagues at the Meteorological Institute also contribute to the analysis by stimulating discussions.

PRELIMINARY RESULTS

Data collection

Data from four very different winters have so far been collected. This variety is a great benefit to the objectivity of our analysis. The interrelations between weather, snowpack and ground conditions have caused close to 10 critical situations, but only a few minor slushflow periods. Thus, from in view of the project, we are waiting for periods of extensive slushflow occurrences.

Year by year differences

Some of the conspicuous differences during the past four winters have been:

- Unfrozen as well as frozen ground before permanent snowcover.
- Permanent snowcover varying from mid October/mid December till early May/mid June.
- Long lasting cold weather from early season till mid March, with substantial precipitation during short periods as well as continual light snowfall, and winters with repeated changes between snowfall, rain and cold, dry weather.
- The maximum snow height at the two study sites varies close to 100 %, i.e. from 120 - 240 cm in Sjønesheia and 160 - 300 cm in Illhullia, respectively.
- Almost homogenous dry snowpack of fine grains until changes due to light rain in mid season, but more often stratified snowpacks of different texture with crusts of snow and ice forming many times through the winter (Fig. 7).
- Snow in drainage channels may some years be saturated and drained several times during winter, or vice versa, repeatedly removed by running water, without slushflows occurring.

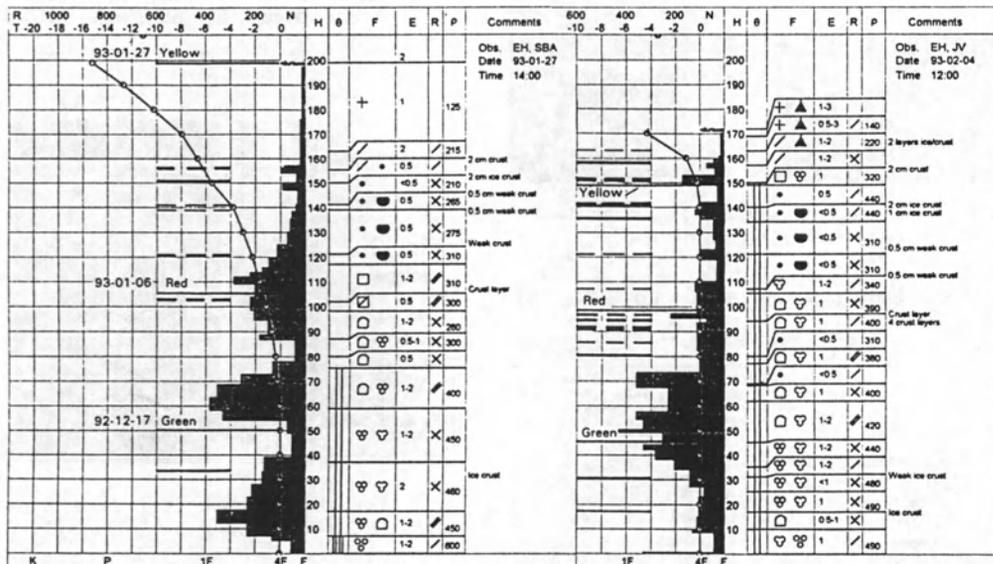


Fig. 7 The snowpack in Illhullia before and after a critical slushflow period 31.01.- 03.02.1993. Crusts and ice layers are intact and more prominent after the period of rain and snowmelt. (See Fig. 8) (Notations according to international standard.)

Environmental influences

The geomorphic characteristics of the fjord and valleys of Rana are previously described by Hestnes & Sandersen (1987).

The meteorological observations at the study sites have documented mutual consistence as well as consistence with the local meteorological stations. There are, however, overall deviations between the sites that can be attributed to the locations and topographic conditions of the district. Differences are often conspicuous during storms. Nevertheless, last winter had an almost identical elapse at the two sites, partly due to temperatures below zero most of the time.

The wind speed at the snow surface is important to snowmelt. The recorded wind speed at ground level and 10 meters above, are almost the same both on the sparsely forested hillside by the fjord and in the coniferous forest. The recorded wind gust averages approximately twice the wind speed at both levels and during storms often close to three times.

Snowpack - development, water fluctuation and stability

The snowpack development during winter clearly reflects the previous weather. The building and disintegration of crusts and ice layers have been of specific interest. Layers formed by freeze-thaw cycles, sun crust formation and retention and freezing of percolating water at or in strata of specific textures, are traced.

The fluctuation of the water level in snowpack during periods of rain and snowmelt is identified by the pressure transmitters. There is a delay in the rise and fall of the water level compared to the timing of the water supply. The principal rise of the water in drainage channels are surprisingly sharp, and seems to occur independent of the amount and intensity of the overall water supply. On the other hand, the rise and elapse of water table in snowpack on level ground, obviously reflects these factors. The drainage of snowpack varies according to the weather and the water retention, controlled by the geomorphic and environmental conditions and snowpack properties (Fig. 8).

Cohesionless new snow and coarse grained snow are most liable to start flowing. A fine grained snowpack is stronger than a coarse grained snowpack. Snowpacks that, prior to the critical weather period, are compact with layers of crust and ice, normally show good stability. Hard crusts and icy layers are observed to withstand more than 3 days of submersion (Fig. 7). This "armour" might, however, be sensitive to sudden shock waves like impact caused by avalanches. This snow structure can be really solid after drainage and refreezing.

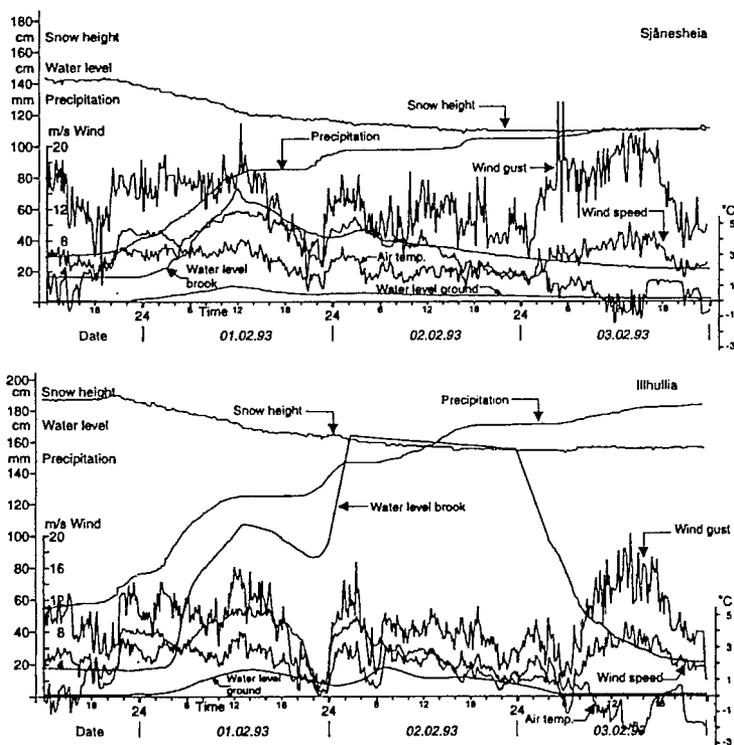


Fig. 8 The elapse of some principal parameters related to snowpack stability during the critical period 31.01.-03.02.1993. Channel depth at study site in Sjønesheia 0.6 m and in Illhullia > 2.0 m.

The critical periods

Critical weather situations have occurred between mid October and late May. Minor slushflows in cohesionless new snow have been observed in November 1991, December 1992 and October 1993. The low density snow of early winter has responded quickly to pouring rain, but the volumes of slush have been limited.

A typical mid winter situation with snowfall followed by extensive rain and snowmelt occurred in the end of January 1993 (Fig. 7-8). The stratified snowpack was remarkably stable and only minor slushflows with channelled flowpaths were released (Fig. 9) (Hestnes 1984, Hestnes et.al. 1995).

A critical spring break-up situation occurred in late April 1994 (Fig. 1). However, the stratified snowpack was fairly stable and the water supply culminated before slushflows were released. Additional 5-6 critical periods have, as well, been identified. Several other weather situations are of analytical interest.



Fig. 9 A small slushflow has occurred within a larger slushflow path. Sjønesheia, 01.02.1993.

The supervision of slushflow hazard

Since the disastrous slushflows on the main road south of Mo in 1981, steps to reduce the risk have been taken by the road authorities (Hestnes & Sandersen 1987). Recently, a plan for supervision of slushflow hazard and emergency service for the exposed sections of the road, has been worked out by the local Road Department and NGI.

Evaluation of the hazard is the responsibility of the person on duty, and is based on data from our field stations and weather prognosis from the Norwegian Meteorological Institute. NGI may provide information about snowpack stability and give advice. The person in charge can also contact the two of us, having access to the field data on our home computers, at any time. Our snow pit observations and the pressure transmitters, indicating the amount and elapse of water accumulation in the snowpack, are of invaluable significance in this respect.

ACKNOWLEDGEMENT

The research project has received economic support from the Norwegian Hydrological Committee, the Nansen Foundation, the Norwegian Railroad Authorities, The Norwegian Road Authorities, the County Road Authorities of Nordland and the Norwegian Geotechnical Institute. This support is gratefully acknowledged by the authors. We also wish to thank the encouraging staff at the local Road Department in Rana for their assistance and offering of excellent accommodation, and the Norwegian Meteorological Institute which place meteorological data at our disposal.

REFERENCES

- Hestnes (E.), 1985 - A contribution to the prediction of slush avalanches. *Ann. of Glac.* 6, 1-4.
- Hestnes (E.), Bakkehøi (S.), 1993 - Sørpeskred Rana. Utvikling av kriterier for vurdering og varsling av faren for sørpeskred. Instrumentering, feltprogram og foreløpige erfaringer fra forskningsprosjekt i Rana. (Slushflow Rana. Development of criterias for evaluation and warning of slushflow hazard. Instrumentation, field programme and preliminary results from a research project in Rana.) *NGI-Rapport* 582000-8, 38pp.
- Hestnes (E.), Bakkehøi (S.), Sandersen (F.), Andresen (L.), 1987 - Meteorological significance to slushflow release. *NGI-Report* 582000-5, 17pp.
- Hestnes (E.), Bakkehøi (S.), Sandersen (F.), Andresen (L.), 1995 - Weather and snowpack conditions essential to slushflow release and downslope propagation. *Proceedings, Int. Snow Science Workshop, Snowbird, Utah Oct. 30 - Nov. 3, 1994*, 18pp.
- Hestnes (E.), Sandersen (F.), 1987 - Slushflow activity in the Rana district, North Norway. *IHAS Publ.* no. 162, 317-330.

Radiometer for the detection of avalanche victims

Radiomètre pour la détection des victimes d'avalanches

M. Šval¹

RÉSUMÉ

La possibilité de la détection des victimes d'avalanches par la radiométrie à hyperfréquence a été le sujet de nombreuses investigations dans le passé. Néanmoins, des différences considérables d'expertises sur la faisabilité de sa réalisation pratique existent encore aujourd'hui.

L'entreprise PAP Telematika de Ljubljana, Slovénie, en collaboration avec la Faculté de l'Electrotechnique et de l'Informatique de Ljubljana, a construit un prototype de radiomètre à hyperfréquence. Dans la contribution nous vous présentons le développement et la construction de radiomètre ensemble avec les résultats expérimentaux et quelques propositions de perfectionnement technique de l'équipement.

ABSTRACT

The possibility of detecting avalanche victims by microwave radiometry has been the subject of numerous investigations in the past. However, there are still considerable differences in expert opinions about the feasibility of its practical implementation.

The PAP Telematika company from Ljubljana, Slovenia in collaboration with the Faculty for Electrical and Computer Engineering, Ljubljana, has constructed a prototype of microwave radiometer. In the paper, the development and the construction of the radiometer are presented together with the results of testing and some suggestions for further improvement of the equipment.

INTRODUCTION

The modern electronic equipments for detecting the location of victims buried by avalanches require from the potential victims to carry a specific object (transmitter, passive repeater, magnetic plate, etc.). If a person who is buried does not carry this object (or does not use it properly), the only hope left for him is to be found by professional rescue teams. Unfortunately, they often come too late to find the victim still alive.

Accordingly, an electronic searching device whose operation is independant from the action of the victim, would prove to be very useful. Such a device should of course be light and mobile, with low consumption of energy and simple handling. Provided that all these requirements are met, these devices could permanently be available in Alpine huts, aerial cableway stations, with Alpine military troops, in police stations, etc. Precious minutes or even hours could be spared and therefore many lives saved.

¹ PAP Telematika, Pivovarniška 6, 61000 Ljubljana, SLOVENIJA, Tel.: ++ 386 61 1335 077

At PAP Telematika from Ljubljana, Slovenia, we aimed at developing a device having the properties mentioned above. We have succeeded to engage some top experts from the Faculty of Electrical and Computer Engineering in Ljubljana (prof. dr. Budin, doc. dr. Vidmar and ing Gajšek). The project is financially supported by the Ministry of Science and Technology of Slovenia.

RADIOMETRICAL METHOD OF DETECTING THE LOCATION OF THE VICTIMS

Each object whose temperature is higher than the absolute zero, radiates electromagnetic power (proportional to its absolute temperature) within a very large frequency spectrum. The maximal radiated power of human body is within the infrared spectrum. With the increasing wavelength (microwave range) the radiated power decreases. In spite of it, the microwave range is more applicable in our case, since the infrared rays hardly penetrate the snow.

With a sufficiently sensitive microwave receiver and a directional antenna we could, in principle, detect a buried victim, whose temperature (at least when alive) is higher than the environmental temperature. This idea seems very attractive, since in this case we need only a receiving device that consumes little energy (differing from the devices that would operate on the radar principle).

The reality is unfortunately not so perfect. The radiometrical method has namely been investigated by numerous experts who have come to the conclusions that are not much encouraging. Interesting is the fact that there are considerable differences in expert opinions about the feasibility of its practical implementation (1), (2), (3).

In technical literature the following main deficiencies of radiometrical method are described:

- The radiated power depends upon the emission coefficient of the body surface. In specific conditions (clothes, type of ground, etc.), a victim may therefore radiate even lower power than the ground itself.
- Attenuation of snow (that is particularly intense in wet snow) increases noise figure of the system. Attenuation increases with frequency. At high frequencies (where it is possible to design a good antenna of reasonable dimensions) the attenuation is so high that it disturbs a reliable detection.
- The environment (rescuers, sun, clouds, forest, etc.) also radiates noise power that intrudes into the system through the side lobes of the antenna. Moreover, this noise power penetrates the snow and scatters.
- The RF interference (diverse transmitters, radars, etc.) also disturb a reliable detection of victims (false alarms). If we increase the frequency bandwidths of the receiver, we get better sensitivity of the system, however, the possibility of RF interference also increases.

CONCEPT OF MICROWAVE RADIOMETER

When conceiving our radiometer we endeavoured to consider the results already obtained in this domain. The following measures have been taken:

- The receiver provides constant switching between two identical antennas by the use of semiconductor switch (see Fig. 1). The antennas are positioned approximately 2.5 m apart (see Fig.2).

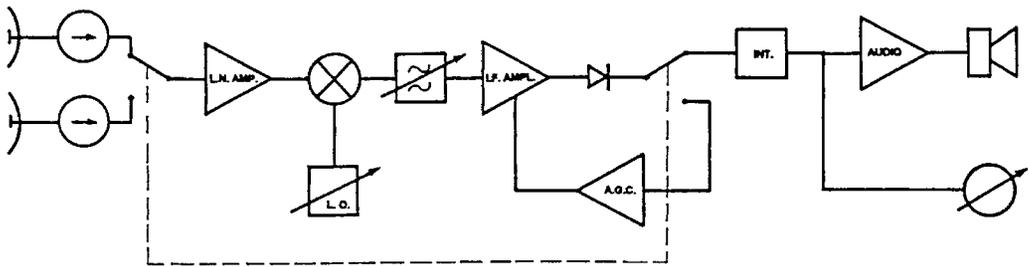


Fig. 1 Block diagram of microwave radiometer

The receiver output is proportional to the difference between the received noise powers of both antennas. The receiver thus reacts also in cases when the victim radiates lower noise power than the ground. It is also possible to set the device in "total power receiver" mode, in which we receive the signal from one antenna only.

- We have chosen relatively low frequency range (1400 MHz) where attenuation of snow is still acceptable even in wet snow.
- Both antennas are of so called helicon type. These are wideband antennas and have very low side lobes. Besides, they are circularly polarized - this is an advantage compared to linearly polarized antennas which could cause problems related to the reflexions from the snow surface. For similar reasons we have put an isolator between the antenna and the input of low noise amplifier.
- The receiver operates in frequency band 1400 - 1427 MHz that is intended for passive radio-astronomical measurements. Though no transmitter is allowed to operate in this band, it is not completely free of RF interferences. The receiver allows (via the control panel) either to increase (100 MHz) or reduce (1 MHz) the bandwidth, as well as a slight change of central frequency. By these options we can considerably reduce the influence of RF interferences.

MECHANICAL DESIGN OF THE EQUIPMENT

The equipment has been designed as a supplement to universal transporting device (stretcher) UT 2000 from the Austrian producer Kohlbrat & Bunz that is used by numerous Alpine rescue services and armed forces in Europe. The device is very light (7 kg) and can be used as a sled in snow. On the front and on the rear side of the device we have fixed the antennas. Each of the two antennas carries a housing containing electronic circuits (Fig. 2).

The first antenna carries the microwave part of the receiver with the controls of central frequency, bandwidth and sensitivity on the front plate. Low frequency circuits, power supply, signalling, and alarm circuits are placed in the housing on the second antenna.

Every asymmetry of the received noise powers of the two antennas results in the final consequence as an acoustic signal (change of pitch) as well as a deflection of the instrument on the front plate.

The equipment can readily be folded for transportation (Fig. 3).

The weight of the equipment is approx. 26 kg.

If we dismount the stretcher into two halves, two persons can carry the equipment on their backs.

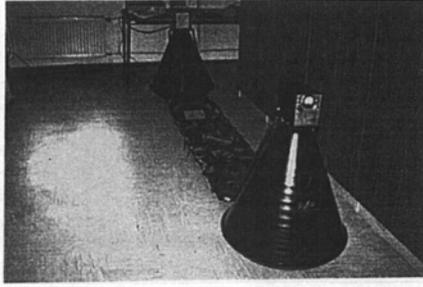


Fig. 2 General view of equipment

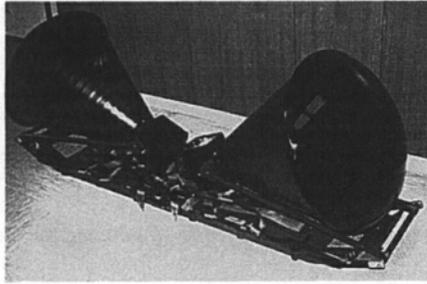


Fig. 3 Equipment in transportation position

AUXILIARY INSTRUMENTS

Owing to the fact that free water content in snow is one of the most critical parameters, we have decided to develop a snow humidity meter as an auxiliary product (Fig. 4)

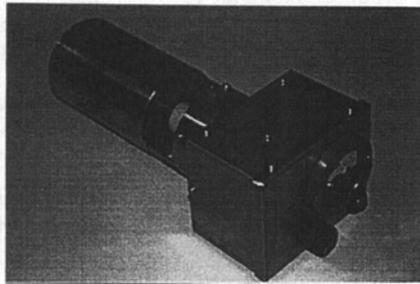


Fig. 4 Snow humidity meter

The instrument actually measures the relative dielectric constant of snow. If we also know the specific weight of snow, we can estimate the snow humidity through diagrams that can be found in literature (5).

To enable easy recording of the radiometer response in the the field (by a plotter), we have constructed a miniature traction device which provides constant speed movement. (Fig. 5).

The traction device and the plotter will be used only at the development phase of the project.



Fig. 5 Field testing of radiometer

FIELD TESTING RESULTS

The field testing of the equipment had been planned for February 1995. Unfortunately, the carrying out of the project activities was much delayed, and the first model of the equipment was ready as late as at the beginning of May 95. At that time, it was impossible to find in Slovenia an accessible terrain that would allow testing on different kinds of snow. We have therefore conducted the test under rather unfavorable conditions, in particular from the viewpoint of snow humidity. The air temperature varied from $+16^{\circ}$ to $+22^{\circ}\text{C}$, and the snow was melting. It was occasionally raining, the free water content in snow varied from 7% to 9% , while the specific weight of snow was between 0.6 and 0.75 kg/dm^3 .

The model of the equipment and auxiliary instruments (especially the plotter) were not fit for severe field conditions (humidity, mechanical shocks, etc.) and we were confronted with often failures.

The effective time in which we could actually evaluate the functioning of the equipment was too short to give the final judgement. I give therefore only some observations:

We have certainly found out that the system of free movable antennas (which had been designed to obtain good fitting to the uneven snow surface) is not good. Namely, on every obstacle we got different inclinations of both antennas and the receiver reacted similarly as in the case when one of the antennas came above the "victim". The traction device that here and there lifted the equipment from the snow surface, caused similar effects and it was very difficult to record the measurements on the plotter.

On a completely even surface we readily perceived through acoustic signalling the "victim" located in a plastic tube of diameter 70 cm, covered with 40 cm of wet snow.

In "total power receiver" operating mode (in which only one antenna is receiving) we noticed less influence of the antenna inclination on the output signal and we were able to record the measurement (Fig. 6).

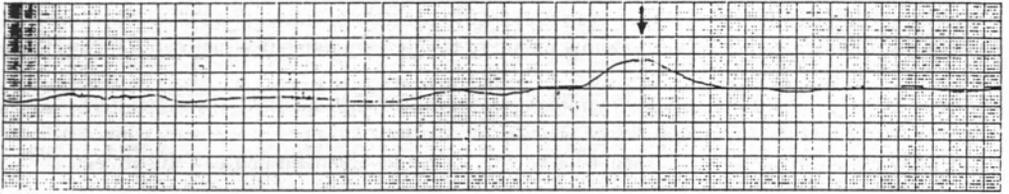


Fig. 6 Recording of "victim" location

The "victim" was in this case wrapped up in blankets and covered with 15 - 20 cm of wet snow. The length of the measurement path was 15 m, while the "victim" was buried 10 m from the start (see the arrow sign on Fig. 6). Unfortunately, heavy rain prevented us from continuing the test with the "victim" buried deeper in the snow.

The attained detection depth is of course still too small for practical use. However, in normal conditions (humidity of snow up to 2%) the attenuation of snow would be essentially lower and therefore we could expect a reliable detection at much greater depth. Of course, we should verify this presumption by field testing.

CONCLUSION

The described model of radiometer will have to be tested in different sorts of snow and should undergo an essential redesign (especially its mechanical construction). The results so far obtained are encouraging and show the possibility of implementing a radiometer that would be in most cases applicable in practice.

REFERENCES

- (1) Schlögel, H. 1975. Untersuchung der Temperaturstrahlung im Mikrowellenbereich unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse bei der Suche von Lawinenschütteten., Technische Hochschule Graz (Dissertation).
- (2) Coumes, A.; Liva, V.; Zadvorny, F. 1978. Testing of Radiometric Detection of Avalanche Victims, Journal of Glaciology, Vol. 20, No. 82, pp. 203-207
- (3) Enander, B.; Larson, G. 1976. On the possibility of detecting avalanche victims by microwave radiometry. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-24, No. 6, pp. 899-901
- (4) Liva, V. 1975. Prototype d'un radiomètre pour la détection des victimes d'avalanches, Simposio V. E., Solda, Italia, pp. 26-30.
- (5) Chilo, J.; Liva, V.; Coumes, A. 1979. Propriétés physiques et propagation en ondes centimétriques, Elektronik und Lawinen 79, Graz, pp. 44-68.

Évaluation de l'impact d'un changement du climat sur l'enneigement des Alpes françaises

E. Martin, E. Brun, Y. Durand¹

RESUME

On se propose ici d'étudier la variabilité de l'enneigement actuel ainsi que sa sensibilité aux paramètres météorologiques. Pour cela, après un examen des mesures actuelles, on utilise un modèle numérique d'évolution du manteau neigeux forcé par un système d'analyse des données météorologiques. Des perturbations introduites dans les données météorologiques d'entrée permettent d'évaluer les modifications correspondantes sur l'enneigement.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to study the variability of the present snow condition and its sensitivity to several meteorological variables. After a short description of available data, a numerical model of snow cover fed by a meteorological analysis system. Perturbations introduced in the meteorological input data of the snow model allow the estimation of the consequences on snow pack.

INTRODUCTION

Certains hivers récents (88/89, 89/90, 92/93) ont été caractérisés par des enneigements en début de saison faibles, voire inexistantes sur les principaux massifs montagneux français. Les conséquences socio-économiques de ces situations ont été telles que beaucoup se sont interrogés sur les liens qui pourraient exister entre ces anomalies répétées et les prémices d'un changement du climat.

Mais la neige ne conditionne pas uniquement la fréquentation touristique des stations de sports d'hiver. Une modification des conditions d'enneigement peut avoir des conséquences hydrologiques et écologiques importantes, à court et à long terme. En effet, la présence de neige en montagne conditionne fortement la ressource en eau disponible plus bas. A haute altitude, la neige est également un facteur limitant de la période de croissance des plantes.

On se propose ici d'étudier la sensibilité du manteau neigeux des Alpes françaises à la variation de certains paramètres météorologiques. Pour cela, on évaluera ce que peut nous apporter l'étude des observations actuelles. La modélisation numérique de l'évolution du manteau neigeux nous permettra ensuite d'estimer l'évolution de cette climatologie en fonction de différentes perturbations des données météorologiques d'entrée.

1. LES DONNEES SUR L'ENNEIGEMENT ACTUEL

Il y a malheureusement peu de mesures anciennes de l'enneigement dans les Alpes françaises. Les réseaux les plus anciens datent de quelques dizaines d'années seulement. Néanmoins, il est possible de tirer des enseignements intéressants des mesures dont on dispose actuellement.

¹Météo-France, Centre national de recherches météorologiques, Centre d'études de la neige, 1441 rue de la piscine, F-38406 St Martin d'Hères CEDEX, France

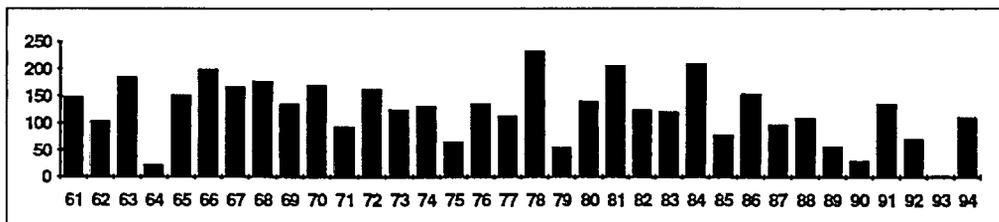


Figure 1 : évolution de la hauteur de neige de 1961 à 1994 sur le site du Col de Porte (1340m, massif de la Chartreuse) la deuxième décennie de février (en cm)
la hauteur de neige moyenne est de 123 cm.

Ainsi l'observation des hauteurs de neige moyennes mesurées pendant la deuxième décennie de février sur le site du Col de Porte, (massif de la Chartreuse, 1340 m., à 20 km de Grenoble, figure 1) montre bien la forte variabilité inter-annuelle de ce paramètre. De l'observation de la série, il ressort que des séries d'hivers fortement enneigés alternent avec des hivers peu enneigés sans qu'il existe de périodicité établie ou de tendances évidentes. Même si la hauteur mesurée en 93 est la valeur la plus basse depuis le début des mesures, on constate que les hauteurs de neige mesurées pendant les hivers cités au début de cet article peuvent être comparées à celles mesurées en 64, 75 ou 79 par exemple.

Des études (Navarre et al, 1990) montrent que l'on retrouve un comportement similaire sur les Alpes françaises et les Pyrénées. En outre, on constate des différences importantes entre la partie nord et la partie sud des Alpes françaises : un enneigement supérieur à la moyenne dans une des zones ne correspond pas forcément à un enneigement supérieur à la moyenne dans l'autre zone.

L'examen des mesures souligne la forte variabilité du paramètre neige (à la fois dans le temps et l'espace) sans que soient mises en évidence des tendances particulières. Mais ces données ne peuvent pas être utiles dans le cadre d'une étude d'impact des changements du climat sur l'enneigement à l'échelle des Alpes parce que la représentativité spatiale des données reste faible et qu'il existe dans la physique de la neige de nombreux effets de seuil (changements de phase par exemple) qui font qu'il est souvent difficile de relier la hauteur de neige à un instant donné avec les paramètres météorologiques classiques comme la température et les précipitations.

C'est pour cela que l'on s'est tourné vers une approche numérique permettant la modélisation de l'ensemble des phénomènes physiques. Cette approche permet, en outre, de faire facilement des tests de sensibilité aux données météorologiques d'entrée.

2. LES OUTILS DE MODELISATION DU MANTEAU NEIGEUX

Deux outils numériques ont été utilisés. Le premier est un modèle unidimensionnel d'évolution du manteau, appelé CROCUS (Brun et al, 1992). CROCUS simule l'évolution du manteau neigeux en fonction des conditions météorologique au-dessus de la surface. Pour obtenir des simulations de l'enneigement à l'échelle des Alpes, il a été associé au système d'analyse des données météorologiques SAFRAN (Durand et al, 1993).

Pour cela, les Alpes françaises ont été divisées en 23 massifs (d'environ 1000 km²), considérés comme homogènes d'un point de vue météorologique. SAFRAN est capable de fournir les paramètres d'entrée de CROCUS (rayonnement infrarouge et solaire incident, température, humidité, et force du vent au-dessus de la surface, précipitations) sur l'ensemble de ces massifs à différentes altitudes. SAFRAN utilise pour cela l'ensemble des informations météorologiques disponibles (observations et résultats de modèles météorologiques).

3. TESTS DE SENSIBILITE

Pour quantifier et comparer entre eux les effets d'une variation des principaux paramètres contrôlant l'évolution du manteau neigeux, on a introduit des perturbations dans les paramètres météorologiques d'entrée de CROCUS et confronté les résultats obtenus à ceux d'une simulation de référence. Cette simulation de référence a été réalisée pour chacun des 23 massifs par pas de 300 m d'altitude pour un terrain plat sur la période 1981/1991. Elle a été validée grâce aux mesures et représente de façon satisfaisante la climatologie nivale actuelle.

A partir de là, diverses expériences ont été effectuées (Martin et al, 1994). Elles ont consisté en la modification d'un ou plusieurs paramètres météorologiques d'entrée du modèle CROCUS, comme la température de l'air, la phase et la quantité des précipitations. Le dernier volet de cette étude de sensibilité a été constitué par la simulation d'un scénario particulier de changement du climat. En effet la nature ne change pas un seul paramètre à la fois et il est nécessaire d'introduire des perturbations cohérentes entre elles des différents paramètres météorologiques pour obtenir des résultats réalistes. Pour cela, on a choisi de travailler sur un scénario climatique correspondant à un doublement du contenu en gaz carbonique (CO₂) dans l'atmosphère. Une analyse des variations des paramètres météorologiques sur les Alpes données par le modèle de circulation générale EMERAUDE (Mafhouf, 1992) a permis d'élaborer un scénario. Bien sûr, ce type d'approche est loin d'être satisfaisant vu la taille de la maille des modèles de circulation générale, mais l'objectif était surtout d'obtenir des perturbations cohérentes entre elles, des différents paramètres. Les perturbations des variables météorologiques correspondant au scénario "doublement du CO₂" ont été les suivantes : rayonnement infrarouge incident : +3 %, température de l'air : +1,8°C transformation de la neige en pluie lorsque la nouvelle température de l'air dépasse 1,5°C.

Sans entrer dans le détail des résultats, on peut dire que deux paramètres (ou groupes de paramètres) sont importants pour le manteau neigeux. Le premier est la température de l'air (et le rayonnement infrarouge, qui lui est lié). Une limite se dessine entre 2000 et 2500 m. Au-dessus, l'effet d'une augmentation de la température, est faible et limité au printemps (accélération de la fonte). Au-dessous, les effets se font sentir même pendant la saison hivernale.

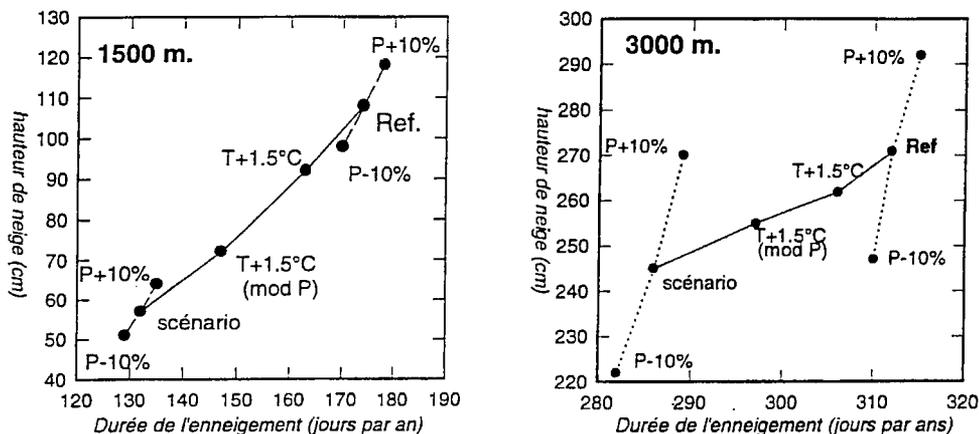


Figure 2 : évolution de la durée moyenne de l'enneigement et de la hauteur de neige moyenne pendant la première décade de mars en fonction de diverses hypothèses pour le massif du Mont-Blanc à 1500m (à gauche) et à 3000m (à droite). Ref : conditions actuelles, T+1.5°C : augmentation de la température de l'air de 1.5°C, T+1.5°C (mod P) : idem plus transformation de la neige en pluie si la nouvelle température de l'air dépasse 1.5°C, scénario : scénario complet décrit dans le 3^{ème} paragraphe, P+10% P-10% : variation des quantités de précipitations de 10%.

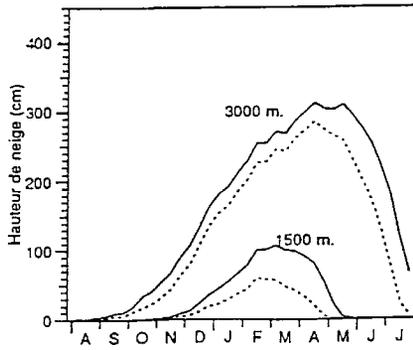


Figure 3 : enneigement décadaire moyen pour le massif du Mont-Blanc à 1500 et 3000m. dans la situation actuelle et dans le cas du scénario climatique décrit dans le 3^{ème} paragraphe

Le deuxième paramètre important est constitué par l'évolution des quantités de précipitations. Son effet est a priori plus facile à appréhender. Par exemple, si on augmente les quantités de précipitations, les calculs montrent qu'on retrouve à peu près la même variation sur l'épaisseur de neige. Par contre la variation est très faible pour ce qui concerne la durée de l'enneigement. En effet, la neige tombée en surplus disparaît en fin de saison, au moment où la température est élevée et la fonte rapide. On obtient des résultats symétriques si on diminue les quantités de précipitations.

L'impact du scénario climatique décrit ci-dessus est très important (figures 2 et 3), que ce soit pour l'épaisseur de neige ou la durée de l'enneigement. Cette dernière, à 1500m, diminue de 30 à 40 jours par an en moyenne, passant par exemple de 174 à 132 jours par an dans la région du Mont-Blanc et de 100 à moins de 60 jours pour les massifs situés à l'extrême sud. La figure 2 décrit l'évolution de la hauteur maximale de neige (en moyenne décadaire sur dix ans) en fonction de la durée moyenne de l'enneigement telles qu'elles ont été simulées par CROCUS pour le massif du Mont-Blanc, à 1500 et à 3000 m, dans la simulation de référence et pour diverses expériences de sensibilité. On remarque bien les effets différenciés de la température et des précipitations. En particulier, il semble improbable qu'une augmentation des précipitations puisse compenser l'effet d'un éventuel réchauffement.

4. VERS DES SCENARIOS PLUS REALISTES

Le principal défaut des scénarios décrits dans le paragraphe précédent tient au fait que les perturbations des paramètres météorologiques sont identiques quels que soient la période, le massif ou l'altitude. On ne prend pas en compte, par exemple, un déplacement des centres d'actions météorologiques, qui modifierait les types de temps affectant la région des Alpes. Or, il est possible que ce genre de modification ait une influence comparable à celle d'une simple variation de la température. Les seuls outils disponibles actuellement capables de fournir de telles informations sont les modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCG). En effet, ces modèles simulent la circulation atmosphérique sur le globe pour des conditions fixées dès le départ : climat actuel, doublement du gaz carbonique dans l'atmosphère, climat plus froids passés... Malheureusement, leurs résultats ne peuvent être utilisés tel quels car leur maille est trop grossière. Il faut avoir recours à des méthodes de régionalisation qui permettent, à partir de l'information à grande échelle fournie par le MCG d'estimer les paramètres nécessaires à l'échelle souhaitée.

On a utilisé une méthode de régionalisation inspirée des techniques de prévision météorologique par recherche de situations analogues. Celle-ci consiste à associer dans un premier temps à un

état de l'atmosphère simulé par un modèle de circulation générale pendant une période donnée (une journée) un état réel de l'atmosphère analogue (c'est à dire le plus ressemblant possible) sélectionné dans un fichier de référence. Ce sont les champs en altitude (700 ou 500 hPa) qui seront utilisés pour déterminer le degré de similarité de deux journées. Du point de vue pratique, cette méthode peut être décomposée en trois étapes :

Etape 1 : Chaque journée de simulation du modèle de circulation générale, est associée à une journée réelle analogue (c'est à dire la plus ressemblante du point de vue des champs en altitude, celle-ci étant extraite d'un fichier de référence à définir)

Etape 2 : SAFRAN analyse les conditions météorologiques sur les sites choisis. Ses données d'entrée étant constituées par l'ensemble des données disponibles de la journée réelle analogue (champs en altitude et observations en surface).

Etape 3 : CROCUS simule l'enneigement à partir des données fournies par SAFRAN.

Cette méthode a été appliquée à trois simulations. La première correspond au climat actuel, les deux autres à un doublement du gaz carbonique (CO₂) dans l'atmosphère. La différence entre les deux dernières simulations se traduit par des jeux de variations des températures de surface de la mer différents. Une simulation a utilisé des données provenant du Max Planck Institut (MPI, Allemagne) la deuxième des données du Hadley Center (HC, Grande Bretagne). Les deux scénarios de doublement du CO₂ se traduisent par une augmentation des températures. Pour ce qui concerne l'expérience MPI, le réchauffement est minimal au printemps (mars-avril), l'augmentation de la fonte devrait être limitée pendant cette période. Pour l'expérience HC, le réchauffement est plus intense (le minimum du printemps est moins marqué).

Les effets sont très différents sur les précipitations. Dans le cas de l'expérience MPI, on assiste à une augmentation des précipitations hivernales totales, ce qui limite l'effet de l'augmentation de la température. Ainsi, à 3000m, les chutes de neige augmentent légèrement. Pour l'expérience HC, les précipitations totales et les chutes de neige sont en baisse à tous les niveaux.

A 1500m, les variations de la durée de l'enneigement sont surtout marquées par l'augmentation de la température (figure 4). La diminution de la durée de l'enneigement est donc générale. Pour



Figure 4 : durée moyenne de l'enneigement à 1500m pour la simulation correspondant au climat actuel (gauche), et aux deux simulations doublement du CO₂ (MPI, au centre, HC à droite).

l'expérience MPI, la diminution la plus marquée se situe dans les Préalpes du nord (Bauges, Aravis, Chablais : 30 jours ou plus). La diminution la plus faible se situant dans les Alpes du sud (Dévoluy, Champsaur, Parpaillon, Ubaye : moins de 10 jours. C'est une conséquence d'une augmentation plus faible de la température dans le sud (0.7°C) que dans le nord (1.0°C) et de l'augmentation des chutes de neige dans les Préalpes du sud, les deux effets étant de même sens. Pour l'expérience HC, la diminution est très uniforme (40 jours par an environ).

A 3000m, la diminution de la durée de l'enneigement est limitée à quelques jours par ans pour MPI (moins de 10 jours en général), les différences régionales trouvées à 1500m ne sont pas visibles car ce paramètre est peu sensible à haute altitude aux variations des précipitations. Pour l'expérience HC, la forte augmentation de la température (conjuguée à la forte diminution des chutes de neige) entraîne des baisses importantes de la durée de l'enneigement (-15 à -40 jours). Les variations les plus importantes sont localisées dans le sud, le massif le plus touché étant le Mercantour.

CONCLUSION

L'étude en parallèle des données du passé et de divers scénarios grâce aux outils de modélisation numériques permettent de mettre en évidence la forte sensibilité du manteau neigeux aux conditions météorologiques. Ainsi, l'observation de longue séries de hauteurs de neige montrent une très forte variabilité inter annuelle qui peut être liée à celles des conditions météorologiques. L'emploi de la modélisation numérique du manteau neigeux permet de tester facilement l'effet qu'aurait une modification de tel ou tel paramètre météorologique sur le manteau neigeux. Deux zones principales ont été mises en évidence :

- les altitudes élevées (au-dessus de 2000, 2500m) où une augmentation des températures se ferait sentir essentiellement pendant la période de fonte, qui serait plus rapide et débiterait plus tôt.
- les altitudes moyennes et basses, où la sensibilité est plus forte. L'enneigement serait fortement perturbé en cas de réchauffement.

La méthode de régionalisation semble être une bonne réponse au problème de la variation des types de temps dans un climat différent. Evidemment, l'étude d'impact ne doit pas s'arrêter uniquement aux épaisseurs de neige et durée de l'enneigement, l'aspect impact sur les ressources en eau est également très important. Mais la comparaison des impacts des deux scénarios de doublement de CO₂ montre bien les efforts à mener dans les domaines de la modélisation de la circulation générale et de la régionalisation pour aboutir à des scénarios climatiques régionaux fiables

En outre, la variabilité actuelle de l'enneigement est si forte que l'on aura beaucoup de difficultés à déceler un changement du climat grâce aux données d'enneigement. Pour revenir aux problèmes d'enneigement des hivers récents, on ne dispose donc pas à ce jour d'éléments objectifs pour les attribuer à un changement du climat des Alpes.

Bibliographie

- Brun E., David P., Sudul M., Brunot G., 1992, A numerical model to simulate snow cover stratigraphy for operational avalanche forecasting, *J. of Glaciol.*, Vol. 38, N°128, pp 13-22.
- Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E., 1993, A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, *Annals of Glaciol.*, Vol. 18, pp 65-71.
- Mahfouf J-F, Royer J-F, Cariolle D., 1992, A 2*CO₂ experiment with prescribed changes in sea surface temperature, *Proceedings of the central symposium of the 'International space year' conference, Munich, 30 mars-4 avril 1992 (ESA SP-341, July 1992), pp 151-155.*
- Martin E., Brun E., Durand Y., 1994, Sensitivity of the French Alps snow cover to the variation of climatic variables", *Annales Geophysicae*, Vol 12, p 469-477.

Liste des participants au colloque

M.	ALBERTI Gianni	Tel. Aminona	3974 Mollens
			SUISSE
			Tél : 41 27 40 22 60 Fax :
M.	AMMANN Waller	Directeur IFENA/EISLF	Flüelastrasse, 11 7260 Davos Dorf
			SUISSE
			Tél : 41 81 417 02 31 Fax : 41 81 417 01 10
M.	ANDRE Cyrille	Président Association Nationale des Pisteurs Secouristes	Maison des Associations Rue St François de Sales 73000 Chambéry
			FRANCE
			Tél : 33 79 33 95 66 Fax : 33 79 33 95 73
Mme	AUGÉ Anne	Division Nivologie CEMAGREF	2 rue de la Papeterie BP 76 38402 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 76 28 13 Fax : 33 76 51 38 03
M.	BAKKEHOI Steinar	Norwegian Geotechnical Institute	P.o. box 3930 Taasen 0806 Oslo
			NORVEGE
			Tél : 47 22 02 30 75 Fax : 47 22 23 04 48
M.	BARIFFI Aldo		Fr. Bonzeno 48 22051 Bellano Co
			ITALIE
			Tél : 39 341 820 384 Fax : 39 342 681 242
M.	BASSETTI Ernesto	Servizio Valanghe Italiano CAI	Via Fonseca Pimentel 7 20127 Milano
			ITALIE
			Tél : 39 226 141 378 Fax : 39 226 141 395
M.	BERNAUDON Roland	Service des Pistes Risoul	SERMER Immeuble "les Mélèzes", Bat. B 05600 Risoul 1850
			FRANCE
			Tél : 33 92 46 07 51 Fax : 33 92 46 00 75

M.	BOLOGNESI Robert	IFENA/EISLF	Füelastrasse, 11 7260 Davos Dorf
			SUISSE
			Tél : 41 81 417 01 53 Fax : 41 81 417 0110
M.	BORREL Gilles	Division Nivologie CEMAGREF	2 rue de la Papeterie BP 76 38402 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 76 27 10 Fax : 33 76 51 38 03
M.	BOUILLARD Bruno	Service des Pistes Les Deux Alpes	Deux Alpes Loisirs - DAL Immeuble le Meijotel 38860 Les Deux Alpes
			FRANCE
			Tél : 33 76 79 75 00 Fax : 33 76 79 20 37
M.	BOUVET Philippe	RTM 74	6 avenue de France 74000 Annecy
			FRANCE
			Tél : 33 50 23 83 94 Fax : 33 50 23 83 95
M.	BRUGNOT Gérard	Chef Division Nivologie CEMAGREF	2 rue de la Papeterie BP 76 38402 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 76 27 11 Fax : 33 76 51 38 03
M.	BRUN Eric	Chef CE N Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 63 79 01 Fax : 33 76 51 53 46
M.	BUISSON Laurent	Division Nivologie CEMAGREF	2 rue de la Papeterie BP 76 38402 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 76 27 95 Fax : 33 76 51 38 03
M.	CASSAYRE Yves	RTM 74	6 avenue de France 74000 Annecy
			FRANCE
			Tél : 33 50 23 83 94 Fax : 33 50 23 83 95

M.	CHOPARD Gilles	Service des Pistes Les Deux Alpes	Deux Alpes Loisirs - DAL Immeuble le Meijotel 38860 Les Deux Alpes
			FRANCE
			Tél : 33 76 79 75 00 Fax : 33 76 79 20 37
M.	CHRITIN Vincent	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne LEMA	ELB Ecublens 1015 Lausanne
			SUISSE
			Tél : 41 21 693 46 26 Fax : 41 21 693 26 73
M.	COMPARAT Jacques	Directeur Service des Pistes Alpe du Grand Serre	SATELAM La Gare 38350 La Mure
			FRANCE
			Tél : 33 76 81 37 75 Fax : 33 76 81 31 77
M.	CORDOLA Marco	AINEVA Regione Piemonte	c/o CSI Piemonte-AINEVA Corso Unione Sovietica 216 10134 Torino
			ITALIE
			Tél : 39 113 180 940 Fax : 39 113 181 709
M.	COSTERG Jean-Lou	Président Association des Directeurs de Service des Pistes	Services Techniques Communaux BP 260 73155 Val d'Isère Cedex
			FRANCE
			Tél : 33 79 06 02 10 Fax : 33 79 06 18 80
Mme	CUINET Ghislaine	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 63 79 00 Fax : 33 76 51 53 46
M.	DAUDON Dominique	Université Joseph Fourier Laboratoire 3S	BP 53 38041 Grenoble Cedex 9
			FRANCE
			Tél : 33 76 82 52 96 Fax : 33 76 82 70 00
M.	DAULTIER Jean-Marc	Service des Pistes Alpe d'Huez	38750 L'Alpe d'Huez
			FRANCE
			Tél : 33 76 80 37 38 Fax : 33 76 80 96 36

M.	DIDIER Roland	Service des Pistes Serre Chevalier	05330 St Chalfrey
			FRANCE
			Tél : 33 92 25 55 00 Fax : 33 92 24 12 07
M.	DRAGOSITS Friedrich	Forstliche Dienst für Wildbach und Lawinenverbauung Sektion Tirol	Lechtalerstrasse 21 6600 Lechaschau
			AUTRICHE
			Tél : 43 567 25775 Fax : 43 567 2577510
M.	DUCLOS Alain	Transmontagne Valfréjus	Le Longe Côte 73500 Aussois
			FRANCE
			Tél : 33 79 05 32 71 Fax : 33 79 05 01 46
M.	DUMAS Jean-Louis	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 63 79 06 Fax : 33 76 51 53 46
M.	DURAND Yves	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 63 79 02 Fax : 33 76 51 53 46
M.	DURJAVA Darjo	Podjetje ZaUrjanje Hudournikov	Hajdrihova 28 61000 Ljubljana
			SLOVENIE
			Tél : 386 61 215 695 Fax : 386 61 210 030
Mme	EVANS Alison	RTM 74	6 avenue de France 74000 Annecy
			FRANCE
			Tél : 33 50 23 83 94 Fax : 33 50 23 83 95
M.	FLAVIGNY Etienne	Laboratoire 3S Université Joseph Fourier	BP 53 38041 Grenoble Cedex 9
			FRANCE
			Tél : 33 76 82 51 45 Fax : 33 76 82 70 00

M.	FLEUR Pierre	Service des Pistes Alpe d'Huez	38750 L'Alpe d'Huez
			FRANCE
			Tél : 33 76 80 37 38 Fax : 33 76 80 96 36
M.	FÖHN Paul	IFENA/EISLF	Weissfluhjoch 7260 Davos
			SUISSE
			Tél : 41 81 417 02 22 Fax : 41 81 417 02 20
M.	FONT Dominic	Departament de Geologia Dinamica, Geofísica i Paleontologia Universitat de Barcelona Facultat de Geologia	Mari í Franques s/n Zona Universitaria de Pedralbes 08028 Barcelona
			ESPAGNE
			Tél : 34 3 402 13 75 Fax : 34 3 402 13 40
M.	FOUQUÉ Jacques	Secours Aérien Français	74400 Argentière
			FRANCE
			Tél : 33 50 54 07 86 Fax : 33 50 54 11 77
M.	GANJU Ashwagosh.	Snow and Avalanche Study Establishment	C/O 56 APO MANALI
			INDE
			Tél : 91 1901 2406 Fax : 91 1901 2406
M.	GARDEN André	Service des Pistes Les Deux Alpes	Deux Alpes Loisirs - DAL Immeuble le Meijotel 38860 Les Deux Alpes
			FRANCE
			Tél : 33 76 79 75 00 Fax : 33 76 79 20 37
M.	GAUER Peter	IFENA/EISLF	Weissfluhjoch 7260 Davos
			SUISSE
			Tél : 41 81 417 02 57 Fax : 41 81 417 02 20
Mme	GAY Françoise	Division Nivologie CEMAGREF	2 rue de la Papeterie BP 76 38402 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 76 27 13 Fax : 33 76 51 38 03

Mme GENDRE Chantal	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
		FRANCE Tél : 33 76 63 79 13 Fax : 33 76 51 53 46
M. GILLET Matthieu	Développeur informatique	26 chemin de Bérivière 38240 Meylan
		FRANCE Tél : 33 76 41 37 98 Fax :
M. GIRARD Michel	Service des Pistes Alpe du Grand Serre	SATELAM La Gare 38350 La Mure
		FRANCE Tél : 33 76 81 37 75 Fax : 33 76 81 31 77
M. GIRAUD Gérard	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
		FRANCE Tél : 33 76 63 79 16 Fax : 33 76 51 53 46
M. GRANADA Francesc	Laboratoire d'Instrumention de Micro-Informatique et d'Electronique Université J.Fourier	BP 53 X 38041 Grenoble Cedex
		FRANCE Tél : 33 76 51 43 65 Fax : 33 76 51 42 53
M. GUBLER Hansueli	ALPUG	AlpuG, Richstattweg 2 7270 Davos Platz
		SUISSE Tél : 41 81 46 10 19 Fax : 41 81 46 10 19
M. GUYOMARCH Gilbert	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
		FRANCE Tél : 33 76 63 79 18 Fax : 33 76 51 53 46
M. HEILIGENSTEIN Laurent	Division Nivologie CEMAGREF	2 rue de la Papeterie BP 76 38402 St Martin d'Hères
		FRANCE Tél : 33 76 76 27 97 Fax : 33 76 51 38 03

M.	HESTNES Erik	Norwegian Geotechnical Institute	P.o. box 3930 Ullevål Hageby 0806 Oslo
			NORVEGE
			Tél : 47 22 02 30 00 Fax : 47 22 23 04 48
M.	HÖLLER Peter	Inst. für Lawinen and Wildbachforschung Forstliche Bundesversuchsanstalt	Hölbürg - Rennweg 1 6020 Innsbruck
			AUTRICHE
			Tél : 43 512 57 39 33 Fax : 43 512 57 28 20
M.	HOPF Joseph	Forst. Dienst für Wildbach und Lawinenverbauung Sektion Tirol	Liebeneggstrasse 11 Postfach 163 6020 Innsbruck
			AUTRICHE
			Tél : 43 512 59612 Fax : 43 512 581216
M.	HORVAT Ales	Technical Director Podjetje ZaUrejanje Hudournikov	Hajdrihova 28 61000 Ljubljana
			SLOVENIE
			Tél : 386 61 21 50 90 Fax : 386 61 210 030
M.	HUGUES Thierry	Chef d'Exploitation Service des Pistes Les Deux Alpes	Deux Alpes Loisirs - DAL Immeuble le Meijotel 38860 Les Deux Alpes
			FRANCE
			Tél : 33 76 79 75 00 Fax : 33 76 79 20 37
M.	JANEAU Yannick	Division Nivologie CEMAGREF	2 rue de la Papeterie BP 76 38402 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 76 27 13 Fax : 33 76 51 38 03
M.	JENKINS Michael	Dept. of Forest Resources	Utah State University Logan Utah 81322-5215
			ETATS UNIS
			Tél : 1 801 797 2531 Fax : 1 801 797 4040
M.	KONETSCHNY Hans	Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft	Lazarettstrasse 67 80636 München
			ALLEMAGNE
			Tél : 49 89 12101543 Fax : 49 89 12101230

M.	KRISTENSEN Krister	Norwegian Geotechnical Institute	P.o. box 236 6880 Stryn
			NORVEGE
			Tél : 47 57 87 73 70 Fax : 47 57 87 73 71
M.	LAMBERT Richard	Université de Savoie	La Vacherie 74230 Thônes
			FRANCE
			Tél : 50 02 19 25 Fax :
M.	LEJEUNE Yves	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 63 79 00 Fax : 33 76 51 53 46
M.	LEPERS Jean-Marc	RTM 74	6 avenue de France 74000 Annecy
			FRANCE
			Tél : 33 50 23 83 94 Fax : 33 50 23 83 95
M.	LEPRETTRE Benoit	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 63 79 00 Fax : 33 76 51 53 46
Mme	LEROUX Catherine	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 63 79 00 Fax : 33 76 51 53 46
M.	LIED Karstein	Norwegian Geotechnical Institute	P.o. box 3930 Ullevål Hageby 0806 Oslo
			NORVEGE
			Tél : 47 22 02 30 00 Fax : 47 22 23 04 48
M.	MAGNUSSON Magnus	Icelandic Meteorological Office	Bustadavegi 9 150 Reykjavik
			ISLANDE
			Tél : 354 560 0600 Fax : 354 552 8 121

M.	MARCO Olivier	Division Nivologie CEMAGREF	2 rue de la Papeterie BP 76 38402 St Martin d'Hères FRANCE Tél : 33 76 76 27 93 Fax : 33 76 51 38 03
M.	MARGRETH Stefan	IFENA/EISLF	Weissfluhjoch 7260 Davos SUISSE Tél : 41 81 417 02 54 Fax : 41 81 417 02 20
Mme	MARTI Gloria	Institut Cartografic de Catalunya	Generalitat de Catalunya. Parc de Montjuic 08004 Barcelona ESPAGNE Tél : 34 3 425 29 00 Fax : 34 3 426 74 42
M.	MARTIN Eric	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères FRANCE Tél : 33 76 63 79 17 Fax : 33 76 51 53 46
M.	MARTINEZ FIGUERAS	Institut Cartografic de Catalunya	Generalitat de Catalunya. Parc de Montjuic 08004 Barcelona ESPAGNE Tél : 34 3 425 29 00 Fax : 34 426 74 42
M.	MARTINEZ Hugo	Division Nivologie CEMAGREF	2 rue de la Papeterie BP 76 38402 St Martin d'Hères FRANCE Tél : 33 76 76 27 16 Fax : 33 76 51 38 03
Mme	MASES Montserrat	Division Nivologie CEMAGREF	2 rue de la Papeterie BP 76 38402 St Martin d'Hères FRANCE Tél : 33 76 76 27 15 Fax : 33 76 51 38 03
M.	MASSELOT Alexandre	CUI - Université de Genève groupe Calcul Parallèle	24 rue Général Dufour 1211 Genève 4 SUISSE Tél : 41 22 705 76 22 Fax : 41 22 320 29 27

M.	MC CLUNG David	University British Columbia	Dept. of Geography and Civil Engineering University of British Columbia 2324 Main Mall, Vancouver BC
			CANADA V6T 1Z4 Tél : 1 604 822 2637 Fax : 1 604 822 6150 (6901)
M.	MEFFRE Jean-François	Avalanche Service International	Casa Joan Cami de l'Esglesia Anyos
			ANDORRE Tél : 376 83 65 43 Fax : 376 83 74 92
M.	MERCEY Bernard	FFS Comité Régional du Forez	16 place Jacquard 42000 St Etienne
			FRANCE Tél : 33 77 33 30 09 Fax :
M.	MERINDOL Laurent	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
			FRANCE Tél : 33 76 63 79 19 Fax : 33 76 51 53 46
M.	MEYER Fabrice	Tel. Aminona	3974 Mollens
			SUISSE Tél : 41 27 40 22 60 Fax :
M.	MICHOUD Steve	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
			FRANCE Tél : 33 76 63 79 00 Fax : 33 76 51 53 46
M.	MIHA Pavsek	Znanstvenoraziskovalni Center Geografski Institut	Gosposka 13, 61000 Ljubljana
			SLOVENIE Tél : 386 61 1256 068 Fax : 386 61 1255 253
M.	MIKHNEVSKY Nicolaï	National Institute of Meteorology and Hydrology	Bulgarian Academy of Sciences 66 Tzarigradsko chausse Blvd 1184 Sofia
			BULGARIE Tél : 359 266 14 81 Fax : 359 288 44 94

M. MINETTI Giorgio

C.U. Sovietica 91
10134 La Stampa (Torino)

ITALIE

Tél : 39 113 180 024 Fax :

M. MINGO Laurent

University of British Columbia

University of British Columbia
Dept of Civil Engineering
2324 Main Mall, Vancouver, BC

CANADA V6T1Z4

Tél : 1 604 822 3885 Fax : 1 604 8226901

Mme NAAIM Florence

Division Nivologie
CEMAGREF

2 rue de la Papeterie
BP 76
38402 St Martin d'Hères

FRANCE

Tél : 33 76 76 27 09 Fax : 33 76 51 38 03

M. NAAIM Mohamed

Division Nivologie
CEMAGREF

2 rue de la Papeterie
BP 76
38402 St Martin d'Hères

FRANCE

Tél : 33 76 76 27 22 Fax : 33 76 51 38 03

M. NAVARRE Jean-Pierre

CEN
Météo France

1441 rue de la Piscine
38406 St Martin d'Hères

FRANCE

Tél : 33 76 63 79 07 Fax : 33 76 51 53 46

M. NETTUNO Lorenzo

Universita di Pavia

Via Abbiategrosso 213
27100 Pavia

ITALIE

Tél : 39 382 505 308 Fax : 39 382 505 589

M. OMMANNEY Simon

Secrétaire Général
International Glaciological
Society

Lensfield Road
Cambridge, CB2 1ER

ANGLETERRE

Tél : 44 122 3355974 Fax : 44 122 3336543

M. OUSSET Frédéric

Division Nivologie
CEMAGREF

2 rue de la Papeterie
BP 76
38402 St Martin d'Hères

FRANCE

Tél : 33 76 76 27 89 Fax : 33 76 51 38 03

M.	PAHAUT Edmond	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
			FRANCE Tél : 33 76 63 79 04 Fax : 33 76 51 53 46
M.	PERETTI Giovanni	AINEVA	Via Milano 18 23032 Bormio (So)
			ITALIE Tél : 39 342 90 50 30 Fax : 39 342 90 51 33
M.	PETIT Dominique	Service des Pistes La Norma	La Norma 73500 Modane
			FRANCE Tél : 33 79 20 31 46 Fax :
M.	POSIERE Marc	RTM 74	6 avenue de France 74000 Annecy
			FRANCE Tél : 33 50 23 83 94 Fax : 33 50 23 83 95
M.	PREVOSTO Jean-Marc	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
			FRANCE Tél : 33 76 63 79 00 Fax : 33 76 51 53 46
M.	RAMMER Lambert	Inst. für Lawinen and Wildbachforschung Forstliche Bundesversuchsanstalt	Hofburg - Rennweg 1 6020 Innsbruck
			AUTRICHE Tél : 43 512 57 39 33 Fax : 43 512 57 28 20
M.	RAPIN François	Division Nivologie CEMAGREF	2 rue de la Papeterie BP 76 38402 St Martin d'Hères
			FRANCE Tél : 33 76 76 27 17 Fax : 33 76 51 38 03
M.	REY Laurent	Conseiller ANENA	23 rue Aristide Bergès 38400 St Martin d'Hères
			FRANCE Tél : 76 54 24 60 Fax :

M. REYNAUD Louis	Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement	Rue Molière 38400 St Martin d'Hères
		FRANCE
		Tél : 33 76 82 42 73 Fax :
M. RIOS ARAGUES	Instituto Tecnológico Geominero de Espana	C/Fernando El Catolico 59, 4°C 50006 Zaragoza
		ESPAGNE
		Tél : 34 76 55 51 53 Fax : 34 76 55 33 58
M. ROBERT Arnaud	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne LEMA	ELB Ecublens 1015 Lausanne
		SUISSE
		Tél : 41 21 693 46 26 Fax : 41 21 693 26 73
Mme ROUSSEL Martine	Division Nivologie CEMAGREF	2 rue de la Papeterie BP 76 38402 St Martin d'Hères
		FRANCE
		Tél : 33 76 76 27 18 Fax : 33 76 51 38 03
Mme ROYER Sophie	University British Columbia	Dept. of Civil Engineering 2324 Main Mall Vancouver BC V6T 1Z4
		CANADA
		Tél : 1 604 730 94 36 Fax : 1 604 822 69 01
Mme SABOT Françoise	Departament de Geologia Dinamica, Geofísica i Paleontologia Universitat de Barcelona Facultat de Geologia	Marti i Franques s/n Zona Universitaria de Pedralbes 08028 Barcelona
		ESPAGNE
		Tél : 34 3 402 13 75 Fax : 34 3 402 13 40
M. SCHAER Mark	IFENA/EISLF	Weissfluhjoch 7260 Davos
		SUISSE
		Tél : 41 81 417 02 55 Fax : 41 81 41 17 02 20
M. SCHAFFAUSER Horst	Inst. für Lawinen and Wildbachforschung Forstliche Bundesversuchsanstalt	Hofburg - Rennweg 1 6020 Innsbruck
		AUTRICHE
		Tél : 43 512 57 39 33 Fax : 43 512 57 28 20

M.	SCHNEEBELI Martin	IFENA/EISLF	Flüelastrasse, 11 7260 Davos Dorf
			SUISSE
			Tél : 41 81 417 01 71 Fax : 41 81 417 01 10
M.	SCHNEIDER Claude	Service des Pistes La Plagne	BP 18 73214 La Plagne
			FRANCE
			Tél : 33 79 09 01 80 Fax : 33 79 09 08 85
M.	SCHNIEWIND Henri	Ski Adventure - Snow Fun	36 résidence les Andes 73150 Val d'Isère
			FRANCE
			Tél : 33 79 06 16 58 Fax : 33 79 41 11 80
M.	SCHWEIZER Jürg	IFENA/EISLF	Weissfluhjoch 7260 Davos
			SUISSE
			Tél : 41 81 417 02 22 Fax : 41 81 417 02 20
M.	SEGULA Pavle	Gorska Reševalna Služba Slovenije	Suska Lesta 34 64220 Skoja Loka
			SLOVENIE
			Tél : 386 64 631 820 Fax : 386 64 620 386
M.	SERGENT Claude	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 63 79 05 Fax : 33 76 51 53 46
M.	STREMPER Klaus	Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft	Lazarettstrasse 67 80636 München
			ALLEMAGNE
			Tél : 49 89 12101527 Fax : 49 89 12101230
M.	SUDUL Marcel	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 63 79 22 Fax : 33 76 51 53 46

M.	SVAL Milan	PAP-Telematika	Pivovarniska 6 61000 Ljubljana
			SLOVENIE
			Tél : 386 61 1335 077 Fax : 386 61 322 157
M.	TAILLANDIER J-Michel	Division Nivologie CEMAGREF	2 rue de la Papeterie BP 76 38402 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 76 27 20 Fax : 33 76 51 38 03
M.	TAILLEFER Alain	CEN Météo France	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
			FRANCE
			Tél : 33 76 63 79 09 Fax : 33 76 51 53 46
M.	TCHERNOOUS Pavel	Antiavalanche Service of Production Association	50 Years of October st 33 a 184230 Kirovsk Murmansk Region
			RUSSIE
			Tél : 7 8153196230 Fax : 47 78914124
Mme	TONDRE Françoise	Conseil de l'Europe	67075 Strasbourg Cédex
			FRANCE
			Tél : 33 88 41 26 16 Fax : 33 88 41 27 87
M.	TOUFFAIT Daniel	Directeur Service des Pistes Val Cenis	73480 Lanslevillard
			FRANCE
			Tél : 33 79 05 96 48 Fax :
M.	TSCHIRKY Frank	IFENA/EISLF	Weissfluhjoch 7260 Davos
			SUISSE
			Tél : 41 81 417 01 25 Fax : 41 81 417 02 20
M.	TUAILLON Jean-Louis	Directeur Service des pistes Les Arcs	Les Arcs 73700 Bourg St Maurice
			FRANCE
			Tél : 33 79 07 85 63 Fax : 33 79 07 74 84

M.	UGARTE Gonzalo	ETAC- Université Catholique du Chili Facultad d'Ingenierie	Eduardo Castillo Vicuna 3363 Providencia Santiago du Chili
			CHILI Tél : 56 223 22 40 Fax : 56 2 049727
M.	VALLA François	Division Nivologie CEMAGREF	2 rue de la Papeterie BP 76 38402 St Martin d'Hères
			FRANCE Tél : 33 76 76 27 21 Fax : 33 76 51 38 03
M.	VILAPLANA Joan	Departament de Geologia Dinamica, Geofisica i Paleontologia Universitat de Barcelona Facultat de Geologia	Marti i Franques s/n Zona Universitaria de Pedralbes 08028 Barcelona
			ESPAGNE Tél : 34 3 402 13 70 Fax : 34 3 402 13 40
M.	VILLECROSE Jacques	Centre Départemental de la Météorologie Nationale	1441 rue de la Piscine 38406 St Martin d'Hères
			FRANCE Tél : 33 76 63 34 20 Fax : 33 76 54 49 81
M.	WUILLOUD Charly	Chef section risques naturels Service des forêts et du paysage du Valais	Bat Mutua 1950 Sion
			SUISSE Tél : 41 27 60 32 06 Fax : 41 27 60 33 04
M.	YAKIMOV Kamen	Bulgarian Red Cross Risk Mountain Service	52. T. Kablechlov Str. Sofia
			BULGARIE Tél : 359 2563012 Fax :
Mme	ZANOLINI Françoise	Pôle Grenoblois Risques Naturels	IRIGM BP 53 38041 Grenoble Cedex 9
			FRANCE Tél : 33 76 51 45 86 Fax : 33 76 51 42 60
M.	ZUANON Jean Paul	Club Alpin Français	31 rue Jean Jacques Rousseau 38400 St Martin d'Hères
			FRANCE Tél : 33 76 42 42 87 Fax :

LOUIS - JEAN
avenue d'Embrun, 05003 GAP cedex
Tél. : 92.53.17.00
Dépôt légal : 742 — Octobre 1995
Imprimé en France

Créer un point de rencontre et d'entente entre théoriciens et praticiens, faire le bilan des apports de la recherche scientifique à la sécurité et envisager les applications concrètes sur le terrain, tels étaient les objectifs de ce colloque international.

Parmi les thèmes traités : évolution et physique de la neige, modélisations des avalanches, transport de la neige par le vent...

The main aims of the international symposium were to create a point of meeting and understanding among theoreticians and practitioners, to clear up the contributions of scientific research to safety and to see concrete applications on the terrain.

Avec le concours de la MAIRIE et de l'OFFICE DU TOURISME de la ville de Chamonix.

Avec le support financier des organismes suivants :

COMMISSION EUROPEENNE DG XII, PROGRAMME ENVIRONNEMENT - RISQUES NATURELS, MINISTERE DE LA JEUNESSE ET DES SPORTS, MINISTERE DES AFFAIRES ETRANGERES, MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE, CONSEIL GENERAL DE HAUTE-SAVOIE

ISBN 2-85362-424-2

Prix : 200 F TTC



9 782853 624244