

SUIVI DU COULOIR AVALANCHEUX DE TACONNAZ

MESURES DE PRESSION ET DE VITESSE SUR DES TAS FREINEURS

Hervé Bellot¹, Florence Naaim-Bouvet¹, Thierry Faug¹, Mohamed Naaim¹, Paolo Caccamo¹ et
Frederic Ousset¹

RESUME

Cet article présente l'instrumentation relative aux mesures automatiques de vitesse et de pression récemment mise en place dans le dispositif paravalanche de Tacconnaz. Tout d'abord l'article analyse le problème de la pression d'impact des avalanches de neige sur la base des mesures expérimentales existantes qui révèlent des spectres d'effort très complexes. En particulier, les questions ouvertes relatives au régime d'écoulement incident et à la géométrie "écoulement-obstacle", et à leurs effets sur la pression moyenne et les fluctuations, sont discutées. Le couloir d'avalanche de Tacconnaz (Chamonix, France), caractérisé par des dimensions exceptionnelles, est alors présenté. Le dispositif de protection passive a été récemment amélioré suite à un travail d'expertise mené par Irstea (anciennement Cemagref). Les ouvrages nouvellement implantés – tas freineurs en particulier – ont été équipés pour mesurer les vitesses locales de l'avalanche au voisinage de ces ouvrages ainsi que les pressions exercées, et ce dans le cadre du projet Interreg Alcotra DYNAVAL. Les premières mesures qui sont présentées ont été obtenues lors de l'avalanche survenue à la fin du mois de décembre 2010.

Mots-clés : neige, avalanche, protection, Tacconnaz, force, métrologie.

ABSTRACT

This paper describes the instrumentation related to speed and pressure measurements recently set up in the avalanche protection system of Tacconnaz. The first part of the present paper aims at analyzing the problem related to the impact pressure stemming from snow avalanches on the basis of experimental measures revealing very complex loading spectra. More particularly, open questions relative to the incident flow regime and the "flow-obstacle" geometry, and to how the mean pressure and fluctuations can be influenced, are discussed. Then, the Tacconnaz avalanche path (Chamonix, France), characterized by remarkable dimensions, is introduced. The passive protection system has been recently improved in the framework of an expertise conducted by Irstea (formerly Cemagref). The new defence structures –retarding mounds in particular- have been equipped with sensors in order to measure the local velocity in the vicinity of those obstacles as well as the impact pressure stemming from snow avalanches, in the framework of the Alcotra DYNAVAL Interreg project. The first measurements have been obtained from the avalanche that occurred at the end of December, 2010.

Keywords: snow, avalanche, protection, Tacconnaz, force, metrology.

INTRODUCTION

Les forces d'impact des avalanches de neige doivent être estimées pour le zonage de l'aléa et pour le dimensionnement des structures exposées (bâtiments, digues paravalanches, pylônes, etc). Il est nécessaire de connaître la dynamique de l'écoulement autour de l'obstacle et le comportement mécanique de la structure soumise à l'avalanche, ce qui rend la question complexe. Les ingénieurs en

UR ETNA. IRSTEA (anciennement Cemagref), 2 rue de la papeterie, BP 76, 38402 Saint-Martin d'Hères (e-mail :
herve.bellot@irstea.fr, Florence.naaim@irstea.fr, thierry.faug@irstea.fr, mohamed.naaim@irstea.fr, paolo.caccamo@irstea.fr,
frederic.ousset@irstea.fr)

charge d'évaluer les pressions dues aux avalanches considèrent souvent une valeur moyenne de la pression alors que les mesures de divers sites expérimentaux montrent des spectres d'effort très complexes (Schaer et Issler, 2001; Sovilla et al., 2008a; 2008b; Thibert et al., 2008; Baroudi et al., 2011). Pour comprendre les processus physiques impliqués dans l'interaction entre les avalanches de neige et les structures et les forces associées, il faut combiner différentes approches: développement de formules analytiques (Naaïm et al., 2008; Faug et al., 2009; Chanut et al., 2010; Faug et al., 2010), modèles réduits de laboratoire avec des matériaux modèles (Faug et al., 2011; Caccamo et al, soumis), simulation numérique à échelle réduite (Faug et al., 2009; Chanut et al., 2010) et expérimentation in situ (Gauer et al., 2007; Sovilla et al., 2008a; 2008b; Berthet-Rambaud et al., 2008; Thibert et al., 2008). La dernière approche, même si elle demande beaucoup d'investissement et ne peut produire des résultats pertinents que suite à une longue durée d'exploitation du site, est cruciale pour tester et valider les modélisations. Dans ce cadre, nous avons entrepris d'équiper plusieurs tas freineurs du dispositif paravalanche hors norme de Taconnaz. L'instrumentation mise en place est aujourd'hui opérationnelle comme le prouvent les premières mesures obtenues lors d'une avalanche survenue en décembre 2010. La première section de l'article discute les questions ouvertes relatives aux forces d'impact des avalanches de neige. La seconde section décrit le couloir d'avalanche de Taconnaz et le dispositif de protection. La troisième section traite de l'instrumentation mise en place et aujourd'hui opérationnelle sur trois des ouvrages paravalanches (tas freineurs): elle permet la mesure simultanée et automatique des vitesses au voisinage des ouvrages et des pressions exercées lorsqu'une avalanche naturelle se déclenche et atteint les ouvrages. Les premières mesures obtenues en 2010 y sont également présentées.

LE PROBLEME DE LA FORCE D'IMPACT DES AVALANCHES

La pression d'impact due à une avalanche de neige est, par nature, fortement transitoire avec (i) des fluctuations σ_p de plus ou moins grande amplitude, à haute fréquence, autour de la valeur moyenne dans le temps $\langle p \rangle$, (ii) la présence d'un maximum de pression p_{max} , (iii) la présence possible –dans certaines circonstances- de plusieurs pics de pressions, p_{peak} (avant le maximum de pression) pouvant correspondre à plusieurs vagues avalancheuses successives, (iv) la présence éventuelle d'une pression résiduelle, p_{res} , pour les obstacles de grandes taille généralement. La Fig. 1 montre des exemples de signaux de pression mesurés sur le site expérimental du Lautaret où plusieurs avalanches déclenchées artificiellement ont impacté une plaque de 1 m² de surface (Berthet-Rambaud et al., 2008; Thibert et al., 2008; Baroudi et Thibert, 2009): les différentes caractéristiques du spectre d'effort (σ_p , p_{max} , p_{peak} , p_{res}) sont représentées sur l'un des signaux de pression d'avalanche.

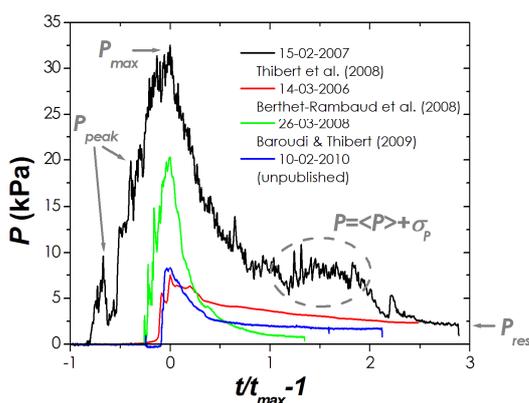


Fig. 1 Pressure p (kPa) versus time. t_{max} is the time for which $p = p_{max}$ (plate-1 m², Lautaret).

Fig. 1 Pression p (kPa) en fonction du temps. t_{max} est le temps pour lequel $p = p_{max}$ (plaque-1 m², Lautaret).

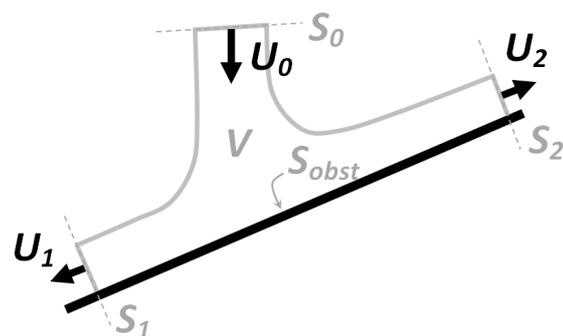


Fig. 2 Sketch of an avalanche that meets a flat obstacle and splits into two fluxes.

Fig. 2 Schéma d'une avalanche impactant un obstacle à face plane et se divisant en deux flux.

Dans la plupart des études d'ingénierie, la pression de dimensionnement, p_{design} , calculée par les praticiens correspond à la valeur maximale de la pression moyenne, $\langle p \rangle$, parce qu'il n'existe pas de

méthode déterministe permettant de quantifier le spectre d'effort complet. Cette manière d'évaluer la pression d'impact est compatible avec les recommandations relatives au dimensionnement des structures métalliques ou en béton armé qui considèrent le plus souvent un *équivalent statique* pour la charge accidentelle due à une avalanche de neige. On peut cependant se demander si une telle hypothèse reste raisonnable au regard des spectres d'effort d'avalanche mesurés. Il existe des relations empiriques entre l'ordre de grandeur de la pression d'impact et le dommage potentiel (McClung et Schaerer, 1993) : $p=1$ kPa (bris de vitre), $p=5$ kPa (porte défoncée), $p=30$ kPa (structures en bois détruites), $p=100$ kPa (arbre âgé déraciné), $p=1000$ kPa (structure en béton armé déplacée). Cependant, des méthodes doivent être développées pour dériver le spectre d'effort complet de l'avalanche d'une part ($\langle p \rangle, \sigma_p, p_{max}, p_{peak}, p_{res}$) et pour prendre en compte les effets dynamiques dans le dimensionnement de la structure d'autre part. Ce travail devrait, si ce n'est éviter, expliquer les effets surprenants parfois observés sur des structures détruites par des avalanches. Cette question n'est pas triviale car elle nécessite des connaissances en *interaction fluide-structure* impliquant un fluide granulaire à rhéologie complexe. A ce stade, nous ferons l'hypothèse que la force d'impact dépend essentiellement du régime d'écoulement incident et de la « géométrie écoulement-obstacle ». En suivant l'exemple de Ancey (2006, chapitre 5), considérons une avalanche de neige assimilée à un fluide homogène qui interagit avec un obstacle et se divise en deux flux distincts comme l'illustre la Fig. 2. Le mouvement de l'avalanche est décrit par le bilan de quantité de mouvement appliqué au volume de contrôle V délimité par la surface S (Fig. 2):

$$\iint_V \frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial t} dV + \oint_S (\rho \bar{u} \bar{u} - pI + \bar{\sigma}) \cdot \bar{n} dS = \iint_V \rho \bar{g} dV, \quad (1)$$

où \bar{u} est la vitesse locale de l'avalanche, ρ la masse volumique, p la pression, $\rho \bar{u} \bar{u}$ le tenseur cinétique associé au flux de quantité de mouvement, $\bar{\sigma}$ le tenseur des contraintes, \bar{n} le vecteur normal orienté de la surface infinitésimale dS , \bar{g} la gravité. L'équation (1) signifie que la variation de vitesse provient de la différence entre le terme de gravité et le flux de $\bar{\Phi} = \rho \bar{u} \bar{u} - pI + \bar{\sigma}$ à travers S . Si on considère la surface S_{obst} en contact avec l'avalanche, la force exercée sur l'obstacle en régime stationnaire devient :

$$\bar{F} = \oint_{S_{obst}} (-pI + \bar{\sigma}) \cdot \bar{n} dS = \iint_V \rho \bar{g} dV - \oint_{S_0 \cup S_1 \cup S_2} \bar{\Phi} \cdot \bar{n} dS \quad (2)$$

L'expression de $\bar{\Phi}$ met en évidence les trois contributions à la force totale : (i) un terme de pression cinétique $\rho \bar{u} \bar{u}$ (flux de quantité de mouvement), (ii) un terme de pression $-pI$, (iii) une contribution associée aux contraintes à l'intérieur du fluide $\bar{\sigma}$. Le terme cinétique est souvent approximé à l'aide du produit de la masse volumique moyenne $\bar{\rho}$ par le carré de la vitesse moyenne \bar{u}^2 . Le terme de pression peut être calculé en écoulement permanent et uniforme pour une configuration d'obstacle fixée mais le calcul est plus complexe dans les autres cas de géométrie « écoulement-obstacle ». La connaissance du comportement rhéologique de la neige (tenseur $\bar{\sigma}$) reste très pauvre jusqu'à présent. Sur la base de l'équation (2), deux régimes, à minima, sont à considérer :

- le *régime inertiel*, rapide, régi par un terme cinétique dominant : $\rho u^2 \gg -p + \sigma$, avec $u = |\bar{u}|$ et $\sigma = (\bar{\sigma} \cdot \bar{n}) \cdot \bar{n}$. Ici, l'avalanche est vue comme un fluide simple exerçant une pression dynamique proportionnelle au carré de la vitesse et à la masse volumique: $p_{dyn} = 1/2 C \rho u^2$ où C est un coefficient sans dimension dépendant de la géométrie écoulement-obstacle. C'est la pression moyenne typique développée par les avalanches en aérosol ou les avalanches denses de neige sèche rapides. Cela correspond aussi à la formule souvent utilisée en ingénierie paravalanche (Salm et al., 1990) avec $C=1$ pour les petits obstacles –par rapport à la largeur de l'avalanche- de forme arrondie (pylônes) et $C=2$ pour les obstacles plus grands à face plane.

- le *régime gravitaire*, lent, régi par un terme cinétique faible : $\rho u^2 \ll -p + \sigma$. Ici, on peut distinguer deux cas (Ancey, 2006): (i) une zone morte se forme à l'amont de l'obstacle (neige complètement bloquée) et dévie le reste de l'écoulement incident, (ii) l'obstacle est submergé par les vagues successives de l'écoulement incident (accumulation progressive de la neige à l'amont de

l'obstacle). La pression peut s'exprimer sous la forme d'une pression hydrostatique indépendante de la vitesse incidente: $p_{dyn} = K\rho gh \cos \theta$, où K est un coefficient sans dimension qui dépend de la géométrie écoulement-obstacle. La valeur $K=1$ correspond à une pression purement hydrostatique.

Lorsque le régime est intermédiaire, il faut sommer les deux termes :

$$p_{dyn} = C \frac{1}{2} \rho u^2 + K\rho gh \cos \theta = \frac{1}{2} \rho u^2 \left(C + \frac{2K}{Fr^2} \right) = \rho gh \cos \theta \left(\frac{1}{2} C Fr^2 + K \right) \quad (3)$$

où Fr est le nombre de Froude de l'écoulement incident. Quantifier de manière déterministe les valeurs des coefficients K et C reste une question ouverte. Les valeurs de K et C sont influencées par plusieurs facteurs : taille de l'obstacle relative à la dimension typique de l'avalanche, forme de l'obstacle, géométrie de l'écoulement au voisinage de l'obstacle. Cet article n'a pas pour objectif de faire un état de l'art de l'ensemble des études relatives à cette question. Ces coefficients peuvent prendre des valeurs importantes comme le prouvent des mesures récentes sur des avalanches de neige sèche (Sovilla et al., 2008a) mais aussi humide (Sovilla et al., 2010). On peut mentionner quelques effets importants influençant ces coefficients. En régime inertiel et pour des obstacles de petites tailles, il faut parfois prendre en compte des effets de compressibilité du fluide et considérer les masses volumiques avant (ρ_1) et après impact (ρ_2) pour exprimer le coefficient C (Kotlyakov et al., 1977 ; Mellor, 1968): $C = 2 \left[1 + (\rho_2 / \rho_1 - 1)^{-1} \right]$. Dans le même régime et pour des obstacles de plus grande taille induisant des déformations importantes de la surface libre, il faut prendre en compte la formation éventuelle d'un ressaut granulaire (Barbolini et al., 2009, chapitre 11): $C = 2 \left[1 + ((\rho_2 / \rho_1)(h_2 / h_1) - 1)^{-1} + 1/2 Fr^2 \right]$, où h_2 / h_1 est le ratio des hauteurs conjuguées du ressaut. L'analyse de la littérature existante sur la neige mais aussi sur les écoulements granulaires rapides et dilués suggère que le coefficient C dépend également des paramètres suivants (Faug, 2012): le nombre de Knudsen, $K_n = \lambda / D$, où λ est le libre parcours moyen des particules et D la dimension transversale de l'obstacle, le coefficient de restitution des grains e , la largeur de l'écoulement incident relativement à la dimension transverse de l'obstacle ℓ / D , la hauteur de l'obstacle relative à la hauteur d'écoulement H / h , etc. Dans le régime gravitaire, à la lumière de la littérature existante sur la neige mais aussi sur les écoulements granulaires denses et lents (Faug, 2012), le coefficient K devrait dépendre des paramètres suivants: la hauteur de l'écoulement relative à la dimension transverse de l'obstacle h / D , la hauteur de l'obstacle relative à la hauteur d'écoulement H / h , l'angle de frottement interne de la neige φ , l'angle de frottement δ associé aux contacts du fluide avec des bords, la cohésion de la neige c , etc. Au delà de la question de la pression moyenne $\langle p \rangle$, il est également nécessaire de mieux comprendre les fluctuations de pression qui peuvent être dues à plusieurs mécanismes (Faug, 2012): impacts isolés d'agrégats de neige pour le régime dilué rapide, formation et destruction intermittente de chaînes de force dans les zones mortes en contact avec l'obstacle dans le régime dense gravitaire, couplage fluide-structure, etc. En plus des questions ouvertes liées à la quantification des coefficients sans dimension C et K pour évaluer la pression moyenne dans les régimes inertiel et gravitaire d'une part et aux fluctuations de pression d'autre part, il est nécessaire de développer des connaissances pour définir les termes additionnels de pression directement liés à la rhéologie du fluide mis en jeu, la neige étant un matériau granulaire polydisperse fragile et cohésif. Face à la complexité du problème, il faut combiner différentes approches comme mentionné en introduction. La mesure directe sur le phénomène in situ est une approche cruciale pour tester et valider les modélisations et fait l'objet de la suite de cet article.

COULOIR D'AVALANCHE DE TACONNAZ : UN SITE EXPERIMENTAL HORS NORME

Il existe plusieurs sites d'avalanche où la dynamique est étudiée et les forces d'impact associées sont mesurées sur différents types d'obstacle (Gauer et al., 2007; Sovilla et al., 2008a; 2008b; Berthet-Rambaud et al., 2008; Thibert et al., 2008): pylônes, plaques, etc. Dans le cadre du projet Interreg Dynaval, nous avons instrumenté avec des capteurs de pression et de vitesse certains des nouveaux tas freineurs récemment construits dans le paravalanche de Tacconnaz (Chamonix, France), suite à un

travail d'expertise menée par Irstéa (anciennement Cemagref) pour améliorer le dispositif de protection paravalanche combinant ouvrages déflecteurs, tas freineurs et digues (Naaïm et al., 2010). Il s'agissait, au sein du projet Dynaval, de couvrir l'ensemble de la gamme des pressions et vitesse, pour permettre, notamment par une approche expérimentale in situ, de mieux définir les pressions résultantes dans la zone d'arrêt d'une avalanche et d'étudier le comportement des écoulements autour des ouvrages. Les trois sites concernés par ce projet étaient les suivants (Tab. 1): Punta Seehore (Italie), Lautaret (France) et Tacconnaz (France). Le présent article ne traite que du couloir de Tacconnaz ; on pourra se référer à la bibliographie pour la description des sites du Lautaret (Baroudi et Thibert, 2009) et de Punta Seehore (Segor et al., 2011).

Tab. 1 Complementarity of the experimental sites in terms of speed, pressure and volume of mobilized snow

Tab. 1 Complémentarité des sites en termes de vitesse, pression et volume de neige mobilisée

Caractéristiques	Punta Seehore (Italie) Petite échelle	Lautaret (France) Echelle intermédiaire	Tacconnaz (France) Grande échelle
Déclenchement	Artificiel	Artificiel	Naturel
Distance d'arrêt	400-500 m	500-800 m	Jusqu'à 7500 m
Pente moyenne	38°	36°	25°
Volume	200-400 m ³	500-10000 m ³	1 600 000 m ³ volume centennal
Pression	0,5 tonnes/m ²	3-5 tonnes/m ²	Jusqu'à 100 tonnes/m ²
Vitesse		Jusqu'à 30-40 m/s	Jusqu'à 70 m/s

Le couloir de Tacconnaz (Fig. 4) est un couloir hors norme recouvert du glacier du même nom, situé dans la haute vallée de l'Arve, à proximité du Mont-Blanc (France). Il s'agit d'un couloir à enjeu, puisque tout au long du siècle dernier, plusieurs avalanches denses et mixtes, de grande ampleur ont atteint les zones habitées à plusieurs reprises (un chalet détruit en 1968, 5 bâtiments détruits ou endommagés en 1984). La surface de la zone de départ, la longueur et le dénivelé de ce couloir en font l'un des plus grands d'Europe. Le couloir de Tacconnaz a une longueur de 7 km et une largeur moyenne comprise entre 300 et 400 m pour une pente moyenne de 25°. Trois zones de départ majeures peuvent être identifiées (Fig. 3) : (i) entre les altitudes 3300 m et 4000 m, une vaste zone glaciaire, de surface égale à 200 ha et de pente moyenne 30° située sous les vents dominants, constitue la première zone de départ; il s'agit d'une zone d'accumulation privilégiée sous les vents dominants et le volume de départ potentiel peut dépasser à lui seul 4 Mm³, (ii) une seconde zone de départ est localisée en aval, entre 2800 m et 3300 m, avec une surface de 80 ha, (iii) enfin, une troisième zone de départ latérale de pente 25°, de longueur 800 m et de largeur 300 m est située entre 2000 m et 2600 m. Les deux premières zones de départ alimentent une zone d'écoulement de 400 m de largeur et de 1800 m de longueur pour une pente moyenne de 31° où l'érosion de la neige par l'écoulement peut être très active. Au dessous de la troisième zone de départ, à une altitude de 2150 m, le couloir se prolonge par une longue zone d'écoulement de pente 30°, de largeur 300 m et de longueur 900 m. Le bassin avalancheux est couvert de glace au dessus de l'altitude de 1700 m et l'avalanche peut entraîner une partie du glacier. On retrouve ainsi des blocs de glace à l'aval dans le dépôt. A l'altitude de 1700 m, l'avalanche rencontre une moraine. Les avalanches très rapides sont susceptibles de la déborder mais la plupart des avalanches sont déviées vers la rive gauche. Après la moraine, l'avalanche entre dans sa zone d'arrêt de pente moyenne 13°.

L'Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA) est organisée par les services forestiers en France depuis le début du siècle dernier. La Base de Données EPA (disponible sur <http://www.avalanches.fr/>) contient les dates des événements avalancheux observés, des informations quantitatives sur les événements (principalement les altitudes de départ et d'arrêt et les trois dimensions du dépôt -longueur, largeur et hauteur- permettant d'estimer le volume de dépôt), ainsi que des informations qualitatives (caractéristiques des avalanches, météo, dégâts, causes, etc....). Sur le site de Tacconnaz, de 1900 à 2000, 75 événements ont été enregistrés. Dans 21% des cas, l'avalanche de Tacconnaz se déclenche seule (chute de séracs), dans 33% des cas lors d'une crue

avalancheuse, dans 46% en même temps que quelques autres couloirs. Dans 61% des cas, l'avalanche atteint ou dépasse l'altitude d'arrivée de 1130 m et dans 22% des cas, l'altitude d'arrivée est même inférieure ou égale à 1080 m. La possibilité d'arrivée de l'avalanche au niveau des habitations de Vers-le-Nant et de Tacconnaz se révèle donc en moyenne tous les 5 ans (sans tenir compte du dispositif de protection). On peut également observer à partir de ces données que l'avalanche s'est produite jusqu'à 4 fois le même hiver à des altitudes inférieures ou égales à 1100 m en 1937 et en 1984.

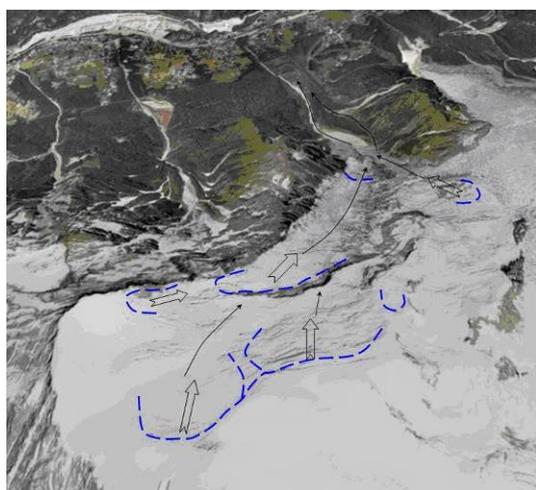


Fig. 3 Release areas of Tacconnaz avalanche path
Fig. 3 Zones de départ du couloir de Tacconnaz



Fig. 4 Tacconnaz avalanche path
Fig. 4 Couloir d'avalanche de Tacconnaz

Couloir à enjeu, le couloir de Tacconnaz a donc été équipé en 1991 d'un dispositif de protection passive conçu pour contenir des avalanches denses humides jusqu'à 800 000 m³. Ce dispositif incluait: (i) des dents déflectrices en béton armé destinées à diffuser le flux avalancheux sur l'ensemble du dispositif, (ii) une zone intermédiaire de freinage comportant des ouvrages en terre renforcée et (iii) une zone aval de dépôt fermée par des digues frontale (digue d'arrêt de 14 m) et latérales (digues de déviation). Le dispositif a connu en février 1999 un phénomène exceptionnel plus par la nature du flux avalancheux composé de neige sèche rapide –très faible frottement- et d'un aérosol que par son volume estimé à 750 000 m³. Ce phénomène a largement débordé du dispositif au delà des digues frontale et latérale (Fig. 5). En 2006, le dispositif a connu un évènement pour lequel il avait été conçu (neige humide d'un volume de 400 000 m³ environ). La moitié des dents déflectrices (conçues pour résister à 30 t/m²) ont été détruites et certains tas freineurs ont été endommagés (Fig. 6).

Les communes locales ont donc décidé de procéder à l'amélioration des ouvrages de protection. Irstea (anciennement Cemagref) a été chargé par le SIVOM de la Haute-Vallée de l'Arve (devenu depuis Communauté des Communes de la Vallée de Chamonix) de concevoir ce dispositif (Naaim et al., 2010). Suite à l'analyse morphologique du site, l'étude s'est réalisée en trois temps : (i) rétro-analyse des évènements recueillis dans la base de données EPA à l'aide d'un modèle numérique d'écoulements denses, et définition des paramètres d'entrée dans la zone d'arrêt en amont des structures de protection, (ii) analyse statistique des précédents paramètres pour caractériser les scénarii centennaux : les valeurs retenues pour l'évènement centennal sont 4.29 pour le nombre de Froude et 1.6 Mm³ pour le volume, (iii) modélisations physique et numérique des avalanches denses interagissant avec les ouvrages de protection afin de dimensionner le système de défense le plus efficace en vérifiant que les améliorations proposées n'accroissent pas le risque résiduel dû à l'écoulement de neige poudreuse en aval des ouvrages. De nouveaux tas freineurs de 7,5 m et le rehaussement de la digue frontale à 25 m ont entre autres été proposés et réalisés: on pourra se référer à (Naaim et al., 2010) pour connaître les détails de l'étude. Ce sont ces tas freineurs qui ont été munis de capteurs et dont on va maintenant s'attacher à décrire l'instrumentation.



Fig. 5 Avalanche deposit of February 1999
Fig. 5 Dépôt de l'avalanche de Février 1999



Fig. 6 Destruction of deflecting walls in 2006
Fig. 6 Destruction des dents défectrices en 2006

INSTRUMENTATION ET ACQUISITION DES DONNEES

Le challenge consistait donc ici à mesurer les vitesses et pressions d'une avalanche pouvant être centennale à l'entrée du dispositif paravalanche. Les vitesses et pressions maximales envisagées, calculées lors de l'expertise précédemment présentée étaient de 60 m/s et 100 tonnes/m². De plus le dispositif de mesures devait être fonctionnel pour des températures allant de -30°C à +30°C.

Pour les mesures de force, nous avons retenu des transducteurs basés sur le principe des jauges d'extensiométrie. Cette technologie a l'avantage de passer très bien les basses fréquences et de pouvoir être compensée en température. Le dispositif de mesures (Fig. 8) est constitué d'une réservation mécanique sur la face amont d'un tas freineur, d'un capteur fixé dans cette réservation et d'une platine qui transmet la pression exercée par l'écoulement au capteur. La platine est de forme circulaire avec un diamètre de 200 mm, ce qui nécessite d'avoir un capteur ayant une plage de mesure allant jusqu'à 30kN pour permettre l'acquisition d'une pression maximale de 100 tonnes/m².

A partir des coefficients de raideur des capteurs k (en N/m²) et du poids P (en kg) des éléments mécaniques nécessaires à leur intégration, nous avons dimensionné la bande passante des capteurs (fréquences de sollicitations du capteur pour lesquelles la réponse de celui-ci est linéaire). Cette dernière est classiquement évaluée à 80% de la fréquence de résonance f_r .

$$f_r = \frac{\sqrt{k/P}}{2 \times \pi} \quad (4)$$

Les capteurs qui ont été retenus sont les PNC710 produits par TCE. Ils disposent d'une plage de mesure allant jusqu'à 30kN avec un coefficient de raideur de $7.5 \cdot 10^8$ N/m

Le poids de la platine cylindrique, transmettant la pression exercée par l'écoulement au capteur, avec le poids de l'axe de fixation nous donne un poids total de 7.545kg, ce qui nous conduit à avoir une bande passante allant jusqu'à 1.2 kHz.

Pour les mesures de vitesses, nous avons utilisé un principe de mesure largement répandu dans la communauté de recherche sur les avalanches (Dent et al., 1998) et que nous avons déjà mis en œuvre sur deux autres expérimentations au Col du Lac Blanc (Bouchet et al., 2003) ainsi qu'au Col du Lautaret.

Le principe de mesure est basé sur le décalage temporel de deux signaux produits par des capteurs à réflexion infrarouge alignés dans le sens de l'écoulement. Les capteurs utilisés sont des OPB608A produits par Opteck. Ils sont constitués d'une photodiode et d'un phototransistor qui travaillent dans l'infrarouge (890 nm). Le signal de sortie du phototransistor est fonction de la capacité de réflexion

de l'objet situé devant le capteur et de la distance entre le capteur et l'objet. Dans le cas de la neige, la réflexion de cette longueur d'onde est suffisante pour générer un signal exploitable. La réponse des capteurs en fonction de la distance de la cible est univoque de 1.27 mm à 9.52 mm. Nous l'avons donc installé derrière une vitre pour maintenir l'écoulement à une distance minimale de 1.27 mm du capteur. La neige passe successivement devant chacun des capteurs. Les phototransistors transmettent deux signaux très semblables décalés dans le temps. Au delà de 9.52 mm un mouvement de la cible ne génère plus de variation en sortie du capteur.

Les signaux que nous allons enregistrer étant discrets en temps, la résolution dV (vitesse minimale mesurable) de cette mesure est de fait conditionnée par la fréquence d'acquisition de la centrale de mesures.

$$dV = \frac{V^2}{f \times d} \quad (5)$$

Avec V , vitesse de l'écoulement en m/s, d distance entre les capteurs en m et f fréquence d'acquisition de la centrale en Hz. Afin de pouvoir avoir une résolution de la mesure de vitesse inférieure à 8%, ce qui faisait partie du cahier des charges, il est donc nécessaire d'avoir une fréquence d'acquisition de 100kHz.

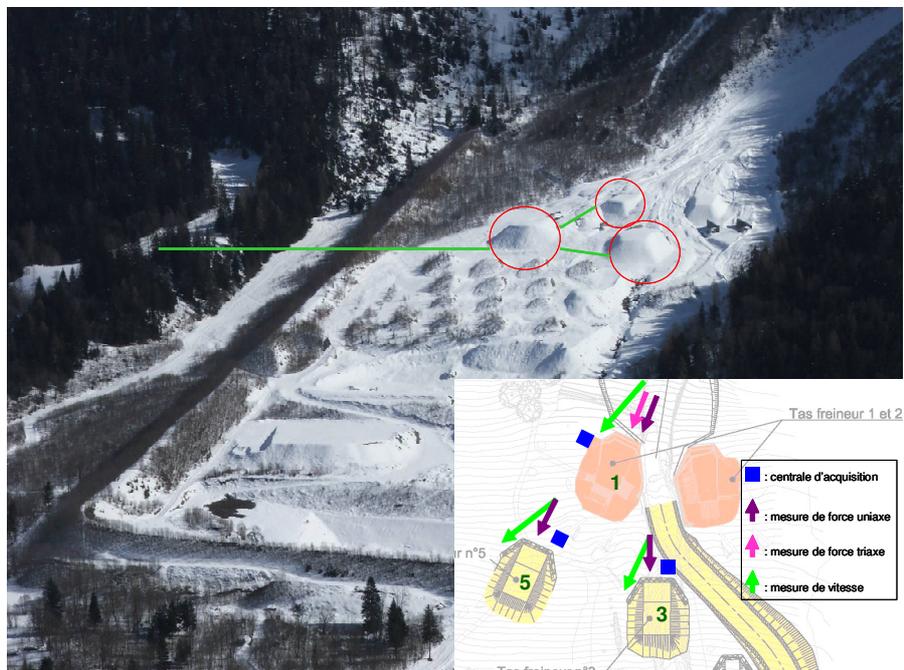


Fig. 7 Location of the measurement points

Fig. 7 Emplacement des points de mesures

Les dispositifs de mesure décrits précédemment ont été déployés sur les angles de trois tas freineur (Fig. 7). Sur chaque tas, deux points de mesure de vitesse et de pression ont été mis en place (Fig. 9). Dans les deux cas, un premier point de mesure est situé à environ un tiers de la hauteur du tas et le deuxième point aux deux tiers. L'intégration mécanique des capteurs se fait sur des platines en acier qui ont été noyées dans un voile béton ferrailé et coulé sur les faces amont des tas. Les capteurs de pression ont été placés face à l'écoulement. Les capteurs de vitesse ont été placés selon un angle de 30° par rapport à la direction moyenne de l'arrivée présumée de l'écoulement.

L'acquisition des signaux se fait pour chaque tas par une centrale Compact RIO protégée dans un coffret étanche, lui-même enterré dans une chambre au pied du tas (Fig. 8). Ces chambres sont reliées entre elles afin de faire passer un réseau intranet ainsi que les alimentations respectives de chaque centrale. Le système de mesures qui a été retenu est un module compact RIO avec un contrôleur embarqué. Celui-ci nous permet d'exécuter le protocole d'acquisition des données décrit précédemment. Sur ce contrôleur un module C. RIO-9239 a été rajouté pour assurer l'acquisition des signaux des capteurs de force. Un des avantages de ce type de dispositif est d'intégrer un filtre anti

repliement qui règle automatiquement la fréquence de coupure à 0.4 fois la fréquence d'acquisition. Cela nous assure ainsi le respect du critère de Shannon. Nous avons retenu comme fréquence d'acquisition 6.4Khz ce qui nous donne une bande passante utile jusqu'à 2,56kHz. Pour les mesures de vitesse nous avons utilisé des modules de mesures CRIO9215 qui permettent de numériser le signal d'entrée à 100kHz, comme requis.



Fig. 8 Data logger and chamber at the foot of the breaking mounds

Fig. 8 Centrale d'acquisition et chambre au pied du tas freineur



Fig. 9 Breaking mound (7,5 m high) with pressure and velocity sensors

Fig. 9 Tas freineur (7,5 m de haut) avec capteurs de pression et vitesse

Sur ce site d'étude, les avalanches ne sont pas déclenchées artificiellement. Du fait des fréquences d'acquisition élevées, nous ne pouvons pas nous permettre d'acquérir les données en continu. Nous nous sommes fixés comme objectif d'acquérir l'intégralité des signaux (vitesse et pression) 60 secondes avant la détection de l'événement et 120 secondes après. Pour cela nous disposons d'une CPU embarquée sur notre système capable d'enregistrer toutes les voies en continu dans une mémoire circulaire avec une périodicité de 60 s. Lors de la détection d'un événement, on arrête d'enregistrer dans la boucle et on concatène 120s d'enregistrement dans un autre espace mémoire. Après l'événement, les données sont remises en forme afin d'être enregistrées sur le disque dur du système. La détection de l'événement se fait à partir des mesures de pression. Un seuil de pression directement issu du capteur ne peut être considéré comme seuil de détection d'événement car le signal d'un capteur de pression varie dans le temps en fonction des variations de température ou de tension d'alimentation. Nous avons par conséquent du filtrer les basses fréquences de ces signaux pour éliminer ces variations lentes. Les hautes fréquences ont également été filtrées pour supprimer d'éventuels artefacts numériques.

Une autre contrainte forte est la nécessité de synchroniser des signaux issus des trois centrales de mesures. Pour cela, toutes les centrales enregistrent un signal analogique généré par la centrale au tas 5 (numérotation des tas sur la Fig. 7). Si l'une des centrales détecte un événement, elle en fait part à la centrale du tas 5 qui fait varier brutalement ce signal de synchronisation. Les centrales qui ne sont pas encore en enregistrement se déclenchent lors de la variation de ce signal.

L'intégralité de ce dispositif est également accessible à l'extérieur du dispositif paravalanche dans une chambre à l'abri de tous événements avalancheux, enterrée à environ 300 m à l'est des tas instrumentés (Fig. 7). Dans cette chambre on dispose d'un accès via l'intranet aux trois centrales, ce qui nous permet donc de consulter les centrales, de les configurer et de télécharger les données acquises. Toute la partie alimentation électrique, qui est secourue en cas de coupure de courant lors d'un événement, est également gérée par l'intranet. Enfin, un routeur GSM nous permet de surveiller le bon fonctionnement des centrales à distance tout au long de l'hiver.

L'ensemble du dispositif de mesures a fonctionné de façon satisfaisante lors de l'évènement avalancheux du 29 décembre 2010 (Figs. 10 et 11).

Pour le post-traitement des données de pression, nous retirons l'offset des capteurs en calculant la moyenne sur 100 points acquis durant les trente secondes précédents l'évènement. Ensuite nous

appliquons les coefficients de calibration a et b établis à partir d'une régression linéaire sur treize points d'étalonnage en charge et en décharge donnés par le constructeur.

$$F = a \times (u(t) - u_{offset}) + b \quad (6)$$

Si l'on déploie un calcul d'incertitude selon la préconisation du GUM (1998) sur la chaîne de mesure allant du capteur à la donnée numérique en intégrant (i) l'incertitude produite par la discrétisation du signal liée au calcul de l'offset ($U(u_{offset})$), (ii) l'incertitude sur les paramètres a et b produite par la régression linéaire ($U(a)$ & $U(b)$) qui couvre les problèmes d'hystérésis et de non-linéarité de la réponse du capteur, l'incertitude produite par la discrétisation du signal sur un point de mesure ($U(u(t))$), on obtient l'équation de propagation des incertitudes suivante :

$$U(F)^2 = a^2 \times U(u(t))^2 + a^2 \times U(u_{offset})^2 + (u(t) - u_{offset})^2 \times U(a)^2 + U(b)^2 \quad (7)$$

Ce modèle de calcul de l'incertitude nous permet d'associer à chaque point de mesure une incertitude liée à la chaîne de mesure.

Si l'on calcule le poids relatif de la contribution de chacune des composantes de l'incertitude il est à noter que le poids lié à la discrétisation du signal est de moins de 1%. Cela vient du fait que la centrale discrétise le signal sur 256 bits et nous retourne donc un signal en tension très précis.

Signaux bruts

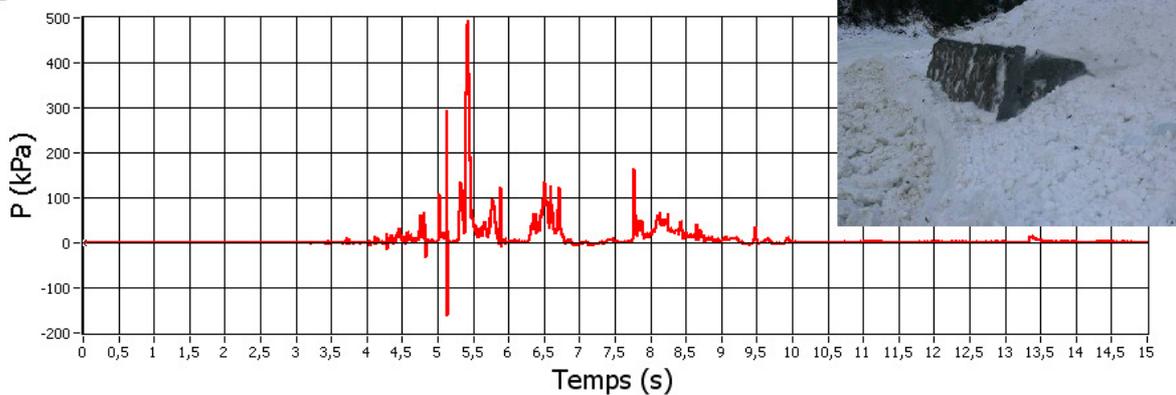


Fig. 10 Example of pressure recorded on December 29, 2010. Insert: Avalanche deposit observed at Taconnaz on December 29, 2010 in the vicinity of breaking mound 3

Fig. 10 Exemple d'enregistrements de pression obtenus le 29 décembre 2010. Photo en insert : dépôt d'avalanche du 29 décembre 2010 au voisinage du tas freineur n°3

Signaux synchronisés (Capteurs de vitesse)

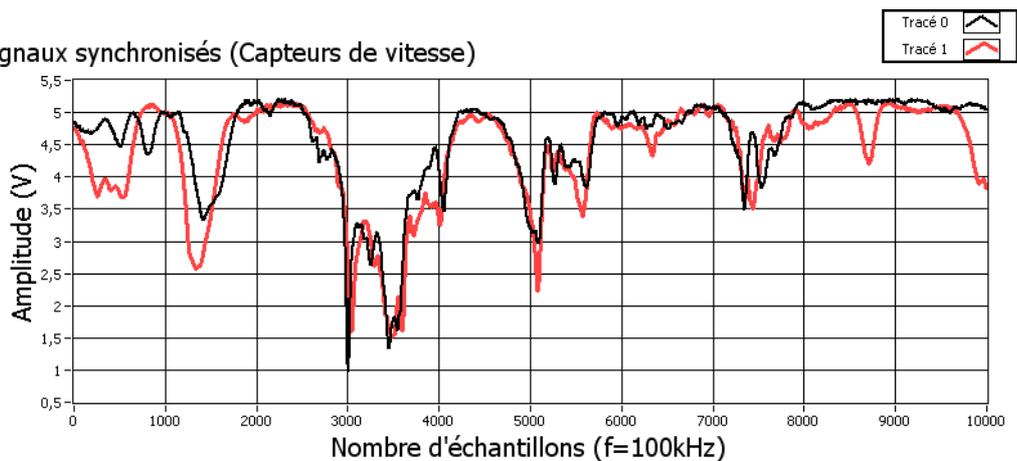


Fig. 11 Example of synchronized voltage signals for velocity sensors on December 29, 2010 (breaking mound 3)

Fig. 11 Exemple de signaux de tension synchronisés pour le capteur de vitesse obtenus le 29 décembre 2010 (tas freineur n°3)

En ce qui concerne les vitesses, pour mesurer le décalage temporel entre les deux signaux (s1 et s2) on calcule l'indice de corrélation entre deux fenêtres de chacun des signaux pour différents décalages temporels via l'équation ci-dessous (Bouchet et al., 2003) :

$$C = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_{i+j} - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_{i+j} - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

Lorsque l'indice de corrélation est maximum on retient ce décalage temporel entre les deux signaux comme étant le temps de parcours du capteur 1 au capteur 2. La distance entre les deux capteurs étant fixe et connue très précisément l'incertitude de la mesure provient de la mesure du décalage temporel entre les deux capteurs. La valeur de l'indice de corrélation est un excellent indicateur pour évaluer la pertinence de la mesure. Lors de l'évènement de décembre 2010, ces différents traitements ont permis l'obtention de premières mesures. La Fig. 10 présente un exemple de signal brut de pression obtenu sur le tas freineur 3 (capteur situé au 2/3 de l'ouvrage). La Fig.11 illustre la bonne synchronisation des signaux de tension issus des capteurs optiques de vitesse sur une fenêtre temporelle de 0.1 s, ce qui montre que la mesure de vitesse est opérationnelle. L'ensemble de ces signaux sont en cours de traitement.

CONCLUSIONS

Cet article a d'abord proposé un bref état des questions ouvertes concernant la pression d'impact des avalanches de neige. Afin de tenter de répondre à ces questions, le couloir d'avalanche de Taconnaz a été équipé de capteurs de vitesse et de pression. Le couloir et son dispositif de protection ont donc été décrits. Puis l'instrumentation automatique mise en place sur les nouveaux tas freineurs du dispositif de protection a été détaillée et illustrée par les premières mesures brutes obtenues. Son opérabilité a ainsi été démontrée, ce qui constituait l'objectif principal de cet article. Les travaux futurs concerneront le traitement et l'analyse de ces premières données et des nouvelles à venir. En effet, les futures acquisitions devraient fournir des informations uniques relatives à la pression d'impact des avalanches de grande ampleur, voire extrêmes, qui se déclenchent à Taconnaz.

REMERCIEMENTS

Ces recherches ont été financées par le projet Interreg Alcotra DYNAVAL (2009-2012) avec le soutien du Conseil Général 74 (Haute-Savoie). Elles se poursuivent désormais au sein du projet Interreg Alcotra Map³, toujours avec le soutien du Conseil Général 74.

REFERENCES

- Ancey C. (2006). Dynamique des avalanches. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Barbolini M., Domaas U., Faug T., Gauer P., Hakonardottir K.M., Harbitz C.B., Issler D., Johannesson T., Lied K., Naaim M., Naaim-Bouvet F., Rammer L. (2009). The design of avalanche protection dams. Recent practical and theoretical developments. European Commission, edited by.
- Baroudi D., Sovilla B., Thibert E. (2011). Effects of flow regimes and sensor geometry on snow avalanche impact-pressure measurements. *Journal of Glaciology* 57(202): 277-288.
- Baroudi D., Thibert E. (2009). An instrumented structure to measure avalanche impact pressure: Error analysis from monte carlo simulations. *Cold Regions Science and Technology* 59: 242-250.
- Berthet-Rambaud P., Limam A., Baroudi D., Thibert E., Taillandier J.M. (2008). Characterization of avalanche loading on impacted structures: a new approach based on inverse analysis; *Journal of Glaciology* 54(185): 324-332.
- Bouchet A., Naaim M., Ousset F., Bellot H., Cauvard D. (2003). Experimental determination of constitutive equations for dense and dry avalanches: presentation of the set-up and first results. *Surveys in Geophysics* 24: 525-541
- Caccamo P., Chanut B., Faug T., Bellot H., Naaim-Bouvet F. (2012). Small-scale laboratory experiments to investigate dry granular avalanche dynamics and forces on a wall-like obstacle. Submitted to *Granular Matter*.

- Chanut B., Faug T., Naaim M. (2010). Time-varying force from dense granular avalanches on a wall. *Physical Review E* 82(4): 041302.
- Dent J.D., Burrell K.J., Schmidt D.S., Louge M.Y., Adams E.E. and Jazbutis T.G. (1998). Density, velocity and friction measurement in a dry-snow avalanches. *J. Glaciology* 26, 247-252.
- Faug T., Beguin R., Chanut B. (2009). Mean steady granular force on a wall overflowed by free-surface gravity-driven dense flows. *Physical Review E* 80(2): 021305.
- Faug T., Chanut B., Beguin R., Naaim M., Thibert E., Baroudi D. (2010). A simple analytical model for pressure on obstacles induced by snow avalanches. *Annals of Glaciology* 51(54): 1-8.
- Faug T., Caccamo P., Chanut B. (2011). Equation for the force experienced by a wall overflowed by a granular avalanche : experimental verification” *Physical Review E* 84, 051301.
- Faug T. (2012). Granular flows around obstacles and induced forces. Application to protection dams against snow avalanches. Mémoire d’Habilitation à Diriger les Recherches en Mécanique (en anglais). Université de Grenoble.
- Gauer P., Issler D., Lied K., Kristensen K., Iwe H., Lied E., Rammer L., Schreiber H. (2007). On full-scale avalanche measurements at the Ryggfonn test site, Norway. *Cold Regions Science and Technology* 49(1): 39-53.
- GUM Guide to the expression of uncertainty in measurement (ISO/IEC Guide 98-3)
- Kotlyakov V.M., Rzhavskiy B.N., Samoylov V.A. (1977). The dynamics of avalanching in the khibins. *Journal of Glaciology*, 19(81): 431-439.
- McClung D.M., Schaerer P.A. (1993). *The avalanche handbook*. The Mountaineers, Seattle.
- Mellor M. (1968). *Avalanches*. U.S. Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Cold regions science and engineering. Hanover, N.H., Part. III.
- Naaim M., Faug T., Naaim-Bouvet F., Eckert N. (2010). Return period calculation and passive structure design at the taconnaz avalanche path (France). *Annals of Glaciology* 51(54): 89-97.
- Naaim M., Faug T., Thibert E., Eckert N., Chambon G., Naaim Bouvet F., Bellot, H. (2008). Snow avalanche pressure on obstacles. *Proceedings Whistler 2008 International Snow Science Workshop* September 21-27, 2008.
- Segor V., Pitet L., Chiaia B., Frigo B., Barbero M., Barpi F., Borri Brunetto M., Bovet E., De Biagi V., Pallara O., Zanini E., Freppaz M., Maggioni M., Bruno E., Ceaglio E., Godone D., Viglietti e Antoine Brulport D.(2011). Sito sperimentale della Punta Seehore. *Neve e Valanghe* 73: 14-19.
- Schaer M., Issler D. (2001). Particle densities, velocities and size distributions in large avalanches from impact-sensor measurements. *Annals of Glaciology* 32: 321-327.
- Sovilla B., Schaer M., Kern M., Bartelt P. (2008a). Impact pressures and flow regimes in dense snow avalanches observed at the vallee de la sionne test site. *Journal of Geophysical Research* 113:F01010.
- Sovilla B., Schaer M., Rammer L. (2008b). Measurements and analysis of full-scale avalanche impact pressure at the vallée de la sionne test site. *Cold Regions Science and Technology* 51(2-3): 122-137.
- Sovilla B., Kern M., Schaer M. (2010). Slow drag in wet-snow avalanche flow. *Journal of Glaciology* 56(198): 587-592.