



Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

CARACTERISER L'ACTION D'UNE AVALANCHE DE NEIGE PAR L'ANALYSE EN RETOUR DE STRUCTURES METALLIQUES

CHARACTERISING THE ACTION OF A SNOW AVALANCHE THROUGH THE ANALYSIS OF METAL TARGET'S BEHAVIOUR

Ph. Berthet-Rambaud^{1,4} A. Pierron¹, A. Limam² J-M Taillandier¹ J. Mazars³

RESUME

Depuis janvier 2003, de nouvelles expériences ont été entreprises sur le site expérimental d'étude des avalanches du Cemagref au col du Lautaret afin d'améliorer la connaissance de l'action d'une avalanche de neige sur un obstacle. Les principaux objectifs sont 1) de fournir des modèles réalistes de distribution de pression utilisables pour la conception en génie-civil et 2) de remplacer les hypothèses très restrictives utilisées actuellement dans ce domaine. Le principe des expériences est basé sur l'analyse en retour du comportement de structures. Il s'agit de mesurer l'action d'une avalanche indirectement par ses conséquences sur des structures adéquates plutôt que par des capteurs placés directement dans l'écoulement. Cette approche est particulièrement utile pour tenir compte de l'influence mutuelle de l'écoulement et de l'obstacle et pour s'assurer que le résultat est vraiment l'action éprouvée par l'obstacle. Pendant la première saison expérimentale, des résultats préliminaires sur la pression maximum ont été obtenus grâce à des plats d'aluminium utilisés en tant que fusibles.

Mots clés : analyse en retour, profils spatio-temporels, pression, avalanche, expérimentations

ABSTRACT

Since January 2003, new experiments have been conducted on the French Cemagref full-scale experimental site in Lautaret Pass in order to improve knowledge on the action of a snow avalanche against an obstacle. The main objectives are 1) to provide realistic and general pressure distribution models usable for civil-engineering design and 2) to replace current restrictive hypotheses in this field. The experiment principle is based on the back analysis of structure's behaviour: quantifying avalanche action from its consequences on realistic structures rather than sensors placed directly in the flow. This approach is particularly useful for taking into account the mutual influence of flow and obstacle and for confirming that the result is truly the action experienced by the obstacle. This approach is also original in that it

Plateforme de recherche "Risques Naturels & Vulnérabilité des Ouvrages" et

1: UR ETNA, Cemagref, 2 rue de la papeterie, BP 76, 38402 Saint-Martin d'Hères, France

2: INSA, URGC, 20 avenue Albert Einstein 69621 Villeurbanne, France

3: R&V, Laboratoire 3S, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9, France

4: CETE-LRPC, Lyon, 25 avenue François Mitterrand, Case n°1, 69674 Bron Cedex, France

ensures the coherence of the method with the tools usually used in mechanics or civil engineering design. During the first experimental season, preliminary results on maximum pressure were obtained with aluminium plates used as fuses.

Keywords : return analysis, space-time pressure profiles, avalanche, experimental

INTRODUCTION

Dans des zones montagneuses, la protection contre des avalanches est un problème important pour la sécurité des infrastructures, des bâtiments et des hommes (McClung et Schaerer, 1993). Dans ce contexte, des solutions existent en mécanique et permettent désormais de concevoir et dimensionner des structures pour des cas de chargements dynamiques, en utilisant par exemple la méthode des éléments finis couplée à des modèles évolués de comportement des matériaux (Berthet-Rambaud et al, 2003). Construire ces structures et assurer ainsi une meilleure protection est également possible du point de vue de la technique. Mais la connaissance des caractéristiques de l'action reste nécessaire pour une approche logique et cohérente.

Or, la recherche n'a pas encore complètement appréhendé l'action d'une avalanche de neige et ses effets. Des valeurs de pression ont été effectivement mesurées et publiées, par exemple dans (Lang et Brown, 1980) mais ces données n'ont pas été exploitées pour le but spécifique de la conception en génie-civil. En particulier, il manque des éléments d'information pour les structures réelles dans un écoulement. Ensuite, certains phénomènes tels que l'apparition d'une zone de stagnation à l'amont de l'obstacle (Faug et al, 2002) sont rarement pris en compte. Enfin, l'influence de l'obstacle sur l'écoulement d'avalanche et par conséquent sur son action ne peut pas être estimée correctement quand les capteurs classiques sont utilisés seuls et de manière non perturbatrice.

En pratique, cette situation à conduit à l'utilisation actuelle de la pression statique équivalente pour concevoir les infrastructures soumises aux avalanches alors qu'avec les outils numériques appropriés, il est possible de montrer que l'évolution dynamique du chargement peut-être largement préjudiciable à la structure pendant l'impact.

L'objectif de cette étude est finalement d'étudier les caractéristiques de l'action d'une avalanche contre un obstacle pour fournir des modèles fiables de profils spatio-temporels de pression utilisables ensuite pour la conception en génie-civil.

PRINCIPE EXPÉRIMENTAL

Pour atteindre l'objectif évoqué, il s'agit de disposer et d'étudier une structure réelle (ou réaliste) dans l'écoulement d'avalanche. Au lieu de capteurs fournissant des mesures locales, les mesures de déformation (et par la suite l'observation des dommages) sur une échelle macroscopique doivent fournir le meilleur indicateur des charges induites par une avalanche de neige. En effet, ces effets globaux sont représentatifs de la complexité de l'action de l'avalanche à laquelle le bâtiment est soumis. Cette action résulte en particulier des influences mutuelles entre la structure et l'écoulement.

Cependant, lier ensuite quantitativement les macro-effets observés à l'action de l'avalanche est difficile du fait de la complexité des phénomènes mis en jeu. Une telle approche indirecte exige ainsi en parallèle, une étude particulière de la structure concernée pour être capable d'en simuler correctement le comportement en utilisant des outils numériques performants complétés d'essais en laboratoire, notamment pour la caractérisation des matériaux. Cette

partie de la démarche est même cruciale pour la qualité des résultats finaux et est basée sur des techniques d'analyse en retour dans le domaine de la mécanique.

Il est ainsi nécessaire de trouver le meilleur compromis entre la précision souhaitée pour ces profils spatio-temporels de pression dans le domaine du génie-civil et les moyens disponibles. Par exemple, la construction d'une maison expérimentale dans un couloir d'avalanche est sans intérêt: premièrement, la question n'est pas l'action que subit un bâtiment particulier mais l'obtention de profils spatio-temporels de pression généraux dans des cas typiques comme celui d'un mur face à l'écoulement. Deuxièmement et sans considérer des coûts, il serait très difficile d'interpréter le comportement d'une telle structure quand des systèmes expérimentaux appropriés et beaucoup plus simples peuvent fournir les mêmes résultats.

Pour être exploitable et utile, notre approche exige ainsi des structures expérimentales adaptées qui combinent la représentativité des vrais bâtiments et la simplicité afin de faciliter l'interprétation de leur comportement. A ce titre, nous montrons ici l'utilité de plats très simples en aluminium, utilisés comme fusibles.

Un autre avantage de cette approche est sa cohérence qui est assurée par l'utilisation des mêmes outils habituellement employés en mécanique ou génie-civil: la précision et la qualité des profils de pression ainsi obtenus fourniront ensuite des données cohérentes et utilisables pour la conception des structures soumises aux avalanches.

Pour résumer, le principe proposé est de mesurer l'action de l'avalanche par ses conséquences sur des structures réalistes plutôt que par des capteurs placés directement dans l'écoulement. La structure expérimentale devient en quelque sorte un macro-capteur.

SITE ET EXPÉRIMENTATIONS

Une nouvelle campagne expérimentale sur le site expérimental du Lautaret

Les premières expériences basées sur la méthode expliquée précédemment ont été installées en décembre 2002 pour étudier les avalanches de l'hiver 2002-2003 sur le site expérimental d'étude des avalanches du Cemagref au Col du Lautaret. Cet emplacement est bien connu par des spécialistes du fait de sa longue histoire expérimentale depuis 1973 (Issler, 1999). Il comporte un total de huit couloirs d'avalanche sur les différents versants de la Crête de Chaillol (2600 m) et trois d'entre eux sont déclenchés artificiellement pour plus de sécurité. Cet emplacement est également facilement accessible toute l'année et dispose d'une infrastructure expérimentale complète.

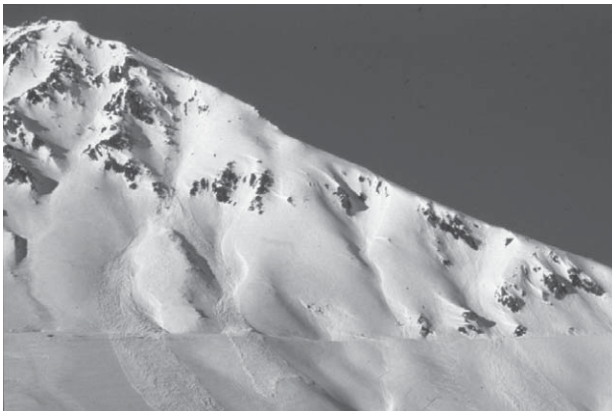


Fig.1 : Site expérimental d'étude des avalanches du Lautaret
Fig.1 : Lautaret avalanche site

En particulier, le couloir d'avalanche numéro 2 est équipé d'un GazEx pour le déclenchement et d'un abri en béton armé disposant de l'électricité pour l'instrumentation, construit à proximité immédiate du couloir. Un tripode-support de 4 mètres de haut est également situé sur la trajectoire de l'écoulement et est relié à l'abri par chemin de câbles pour l'acquisition des données.

Des avalanches de petites à moyennes ampleurs se produisent dans ce couloir avec une fréquence intéressante (jusqu'à 3 ou 4 par hiver). Les écoulements sont généralement denses, de neige humide ou sèche avec parfois la formation d'un aérosol. La distance d'écoulement varie de 500 à 800 m de long avec une pente moyenne du versant de l'ordre de 36°. Les avalanches s'arrêtent sur une partie dégagée à une altitude minimale de 2040 m. Les volumes de neige en jeu peuvent atteindre plusieurs milliers de mètres cubes.

Ces caractéristiques font de ce site un lieu particulièrement intéressant pour étudier les structures soumises aux avalanches et ces écoulements sont tout à fait représentatifs d'avalanches pouvant toucher des habitations ou des infrastructures. Sur ce point, il faut d'ailleurs noter que les règles de zonage empêchent heureusement la plupart du temps le contact direct entre les enjeux de notre société et les avalanches de grande ampleur.

Après une période d'activité réduite de deux ans, une nouvelle campagne d'expérimentation sur le site du Lautaret a donc été organisée pour approcher progressivement l'objectif suivant: obtenir des modèles réalistes de profils spatio-temporels de pression utilisables pour la conception en génie-civil.

Cette campagne expérimentale inclut les étapes suivantes:

Première saison (hiver 2002-2003)

- amélioration de l'infrastructure du site comprenant l'instrumentation (basée sur des jauges de contrainte) et l'acquisition des données
- validation pratique du principe de mesure avec des microstructures soumises aux avalanches
- développement théorique et validation à partir d'essai en laboratoire de l'analyse en retour des déformations
- premiers résultats, en particulier sur des valeurs maximum de pression à différents niveaux

Deuxième saison (hiver 2003-2004)

- équipement d'un deuxième couloir avec une macro-structure plus représentative d'un vrai bâtiment
- développement d'un modèle numérique de comportement pour cette structure
- mesures et expérimentations sur les deux couloirs équipés

Mesures à partir de microstructures fusibles

L'analyse en retour de structures métalliques soumises à une avalanche de neige peut nous permettre de mesurer la distribution de pression dans l'écoulement. Cependant, les structures choisies doivent être d'une géométrie simple pour assurer une cinématique unique et par conséquent un mode de rupture reconnu et exploitable.

Ainsi, cette première campagne expérimentale utilise le tripode support existant dans le couloir d'avalanche n°2 sur lequel des plats en aluminium sont employés comme des structures fusibles. Ces structures très simples ont été conçues pour avoir différentes capacités

résistantes: après l'écoulement, certains d'entre elles sont intactes (maintien dans le domaine élastique) ou endommagées. En employant un nombre suffisant de ces structures à différents niveaux dans l'avalanche et en analysant les déformations obtenues, il est alors possible de déterminer le profil vertical de pression maximum subi par un obstacle.



Fig.2: Fusibles aluminium sur le tripode support
Fig. 2: Aluminium targets on the support

Pour l'analyse, un calcul paramétrique où la charge est incrémentée permet d'obtenir sous certaines hypothèses la déformation correspondant à la valeur de pression appliquée. Cette pression est ensuite reliée avec l'état résiduel de déformation obtenue après l'avalanche en tenant compte du retour élastique de la structure. Cette simulation doit également prendre en compte et évaluer la progression des déformations plastiques qui peuvent largement apparaître avec les dommages subis par certains fusibles.

CONCEPTION DES FUSIBLES

Comme évoqué précédemment, la géométrie et la position des fusibles dans l'écoulement d'avalanche doivent garantir un mode unique de déformation afin de faciliter l'analyse en retour des déformations. Nous avons ainsi choisi une structure de plat parfaitement encastree à une extrémité (voir le schéma 2 et 3). L'élanement du plat (rapport L/e) est ensuite suffisant pour garantir son comportement en flexion simple et pour bien localiser la charnière plastique proche de l'encastrement. Dans un premier temps, la largeur l est arbitrairement fixée. Le fusible est finalement placé perpendiculairement à la direction d'écoulement de l'avalanche à différents niveaux (verticalement et horizontalement).

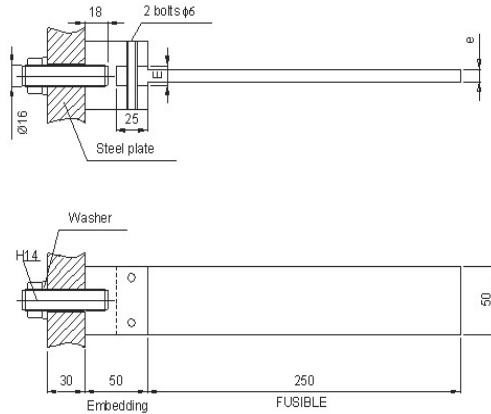


Fig.3: Structure des fusibles
Fig. 3: Fuse structure

Les fusibles sont fabriqués en aluminium. Le comportement de ce matériau est globalement bien connu et un de ses avantages est notamment que sa sensibilité à la vitesse de déformation reste faible dans la gamme de vitesse qui nous intéresse (Langseth et Hopperstad, 1996), (Lindholm et al, 1971), (Abah et al, 1998). Ceci permet donc d'éviter un paramètre additionnel, facilitant la simulation numérique qui peut se contenter de calculs statiques. Une fois que les paramètres géométriques et matériels sont choisis, des calculs prédictifs sont effectués pour déterminer l'épaisseur des fusibles en fonction de valeurs prévisionnelles de pression et pour disposer d'une courbe charge-déflexion pour chaque type de plat utilisé. Ces simulations sont basées sur la méthode des éléments finis qui est maintenant largement utilisée dans modéliser le comportement de structures dans diverses configurations de charge. L'utilisation de telles approches dans la conception est de plus en plus répandue notamment avec la disponibilité de logiciels éprouvés à des coûts raisonnables.

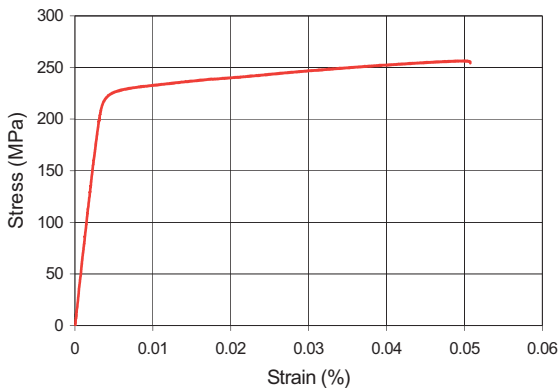


Fig.4: Courbe contrainte-déformation de l'aluminium A6060 T5 – test en tension direct
Fig. 4 : Stress / Strain curve for Aluminium A6060 T5 - direct tension test

Pour les simulations, nous avons ainsi employé le logiciel éléments finis CASTEM 2000. La structure a été maillée en éléments DKT triangulaires (Discrete Kirchoff Triangle) (Batos et Dhatt, 1990) qui sont des éléments de coque à trois nœuds et six degrés de liberté par nœud. Cinq points d'intégration ont été considérés à travers l'épaisseur de chaque élément pour évaluer correctement la progression de la plasticité. Nous avons également raffiné le maillage près de la condition de bord encastrée, zone de développement d'une possible charnière plastique. Une analyse non linéaire combinant de grands déplacements, grandes rotations, et la plasticité a été effectuée. La loi pour le comportement du matériau a été obtenue par l'intermédiaire d'essais de tension quasi-statiques en laboratoire. Les spécimens d'essai ont été utilisés conformément aux normes en étant notamment découpés directement dans le plat d'aluminium à partir duquel les fusibles ont été fabriqués. Les résultats du test sont obtenus à partir de jauges de contrainte collées des deux côtés de chaque échantillon. Les caractéristiques obtenues pour le matériau sont présentées sur la figure 4.

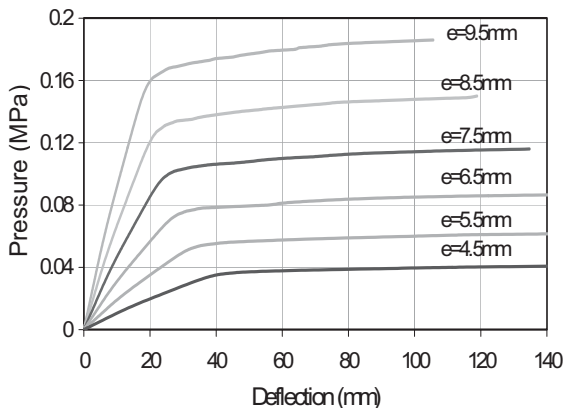


Fig.5: Courbes charge – déflexion des fusibles
 Fig. 5 : Load - Deflection curves of the targets

Pour la simulation, la charge appliquée à la structure correspond à une pression uniforme graduellement incrémentée. Aucune interaction n'a été considérée entre la structure et la charge, la pression a été assumée conservatrice (avec une direction constante). Le schéma 5 montre les courbes charge-déflexion obtenues finalement pour les différents fusibles utilisés. Les déplacements correspondent au déplacement maximum obtenu à l'extrémité libre du fusible.

VALIDATION EN LABORATOIRE DE LA SIMULATION NUMERIQUE

Pour évaluer la pertinence de l'ensemble de la démarche et valider la simulation numérique, un essai expérimental de laboratoire a été effectué avec un plat de fusible de 8.5 mm d'épaisseur.

L'essai quasi-statique de flexion a été effectué à l'aide d'une machine d'essai universelle modifiée. Les conditions aux limites étaient exactement identiques à celles des fusibles sur le tripode-support et soumis aux avalanches, mais au lieu d'une pression distribuée, une charge locale a été appliquée à l'extrémité libre. Pendant l'essai, la direction de la charge appliquée a

été maintenue verticale. La courbe charge-déflexion suivante a été obtenue à partir de cet essai et comparée ensuite aux résultats de la simulation numérique.

Les résultats montrent ainsi une très bonne capacité à simuler la réalité : la progression des déformations plastiques dans l'épaisseur du plat près de la charnière plastique est bien prise en compte comme l'illustre les parties non linéaires très proches entre les courbes expérimentale et numérique. Après atteinte de l'état final, correspondant au plateau, la structure a été déchargée. Ceci permet de mesurer la déflexion résiduelle intégrant le retour élastique qui a lieu à la disparition de la charge. A noter que le déchargement n'est pas contrôlé expérimentalement. Ceci explique la variation de la rigidité observée et l'irrégularité des mesures lors de ce déchargement. Cependant, la valeur résultant de ce retour élastique est correctement simulée et évaluée par la simulation numérique.

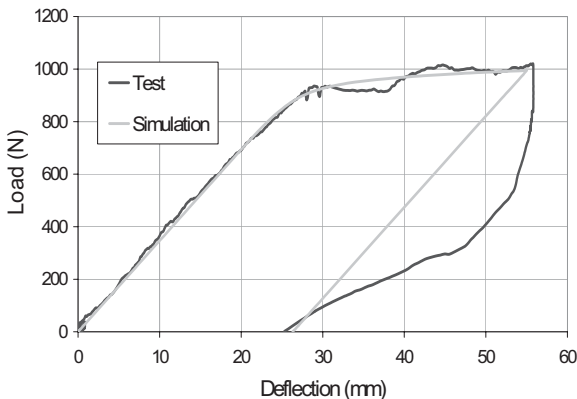


Fig.6: Courbe charge – déflexion (expérimentale et numérique) pour un fusible de 8.5 mm d'épaisseur
 Fig. 6 : Load / Deflection curves (experimental and numerical) for an 8,5mm thick target

La validation de la simulation numérique conduite sur cet essai en laboratoire très proche des conditions réelles permet d'utiliser cette approche indirecte d'analyse en retour pour mesurer la pression reçue par les fusibles sur lesquels une déflexion résiduelle est observée après le passage d'une avalanche. Cette déflexion résiduelle est le paramètre important de la méthode proposée.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX: L'AVALANCHE DU 14 JANVIER 2003

Plusieurs avalanches ont été déclenchées sur le site du Lautaret pendant l'hiver 2002-2003 et ont généré des déformations et des dommages sur différents fusibles (à noter d'ailleurs qu'une fois qu'un plat de fusible est déformé, il est changé avant la prochaine avalanche). Parmi ces événements, l'avalanche du 14 janvier 2003 était particulièrement représentative des écoulements attendus sur le site.



Fig.7: Fusible III.d.B après l'avalanche du 14-01-2003

Fig.7: fuse III-d-b after the 14-01-03 avalanche

En utilisant l'approche décrite précédemment, de premières valeurs de maximum de pression ont été produites et sont récapitulées dans le tableau 1 avec les déflexions maximales observées et la pression associée estimée par la simulation numérique.

Tab.1 : évaluation de pressions maximums à partir de fusibles endommagés par l'avalanche du 14-01-2003

Tab.1 : maximum pressure evaluation from some targets damaged by 14-01-03 avalanche.

Fusible	Epaisseur (mm)	Côte (m)	Déflexion maximale mesurée (mm)	Pression maximale correspondante (kPa)
IV-d-b	4.3	3.60	28	35
III-d-m	6.47	2.75	153	87
III-d-b	8.5	2.54	61	146
II-d-h	4.56	1.96	221	43
II-d-b	8.57	1.54	53	148

Ces résultats sont très intéressants et prometteurs pour plusieurs raisons:

Tout d'abord, les mesures de la densité de neige avant l'avalanche et l'évaluation de la vitesse d'écoulement par les moyens visuels utilisés sur le site sont respectivement d'environ 300 kg.m⁻³ et de 30 m.s⁻¹. L'équation habituelle donnant la pression dynamique maximum comme $P=0.5 * r * v^2$ où r est la densité et le v la vitesse, donne 135 kPa de pression. Ce point confirme donc déjà que les résultats obtenus sont réalistes.

Deuxièmement, les fusibles ont été prédimensionnés à partir d'anciennes mesures de pression obtenues sur le site du Lautaret avec d'autres moyens expérimentaux dans les années 70 (Marco, 1994). Or, les nouvelles valeurs obtenues semblent plus élevées que prévues ce qui confirmerait la sensibilité aux moyens de mesure utilisés. Pour confirmer ce point, un capteur classique de pression sera ajouté en parallèle pour comparer ces deux méthodes.

En conclusion, si nous traçons un profil vertical de pression des valeurs du tableau 1, nous obtenons une forme très irrégulière. Cependant et en considérant le fusible II-d-h, la valeur maximum qu'il doit être capable d'indiquer avec ses caractéristiques est moins de 50 kPa (voir la fig. 5). Or, dans le cas d'un fusible qui a été considérablement déformé, le résultat ne correspond pas à la pression subie mais à une basse limite de cette pression. En effet, quand la déflexion devient trop élevée, le problème ne peut plus être considéré de la même façon et nécessite de prendre en compte la combinaison des actions tangentielles et normales. Par ailleurs, un fusible ne peut pas être plus fléchi que sa flexion maximale, quelle que soit la pression appliquée. Dans le cas présent, cela tend à montrer que le fusible utilisé n'était pas adapté à la situation et que pour les futures expériences, des fusibles plus résistants doivent être employés. Le problème est alors de choisir la bonne épaisseur: Suffisamment fin pour

subir une déformation mais aussi suffisamment épais et résistant pour ne pas être complètement fléchi. Finalement et en éliminant ce point, ce premier profil de pression maximale sur la hauteur est beaucoup plus satisfaisant.

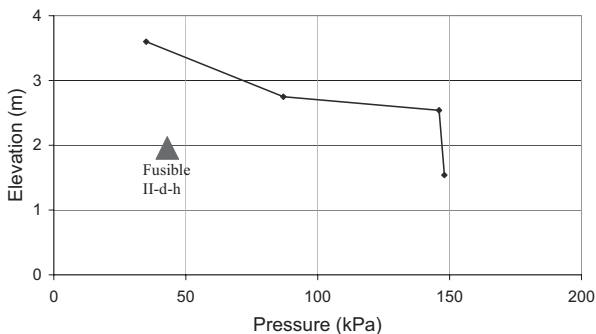


Fig.8: Profil de pression vertical pour l'avalanche du 14-01-2003
Fig.8: Vertical pressure profile of 14-01-03 avalanche

Naturellement, ce sont là les premiers résultats obtenus sur une seule avalanche, qui doivent donc être confirmés, mais la méthode est très prometteuse. Il est d'ores et déjà prévu d'utiliser plus de fusibles dès la prochaine saison pour multiplier les points de mesures et améliorer les résultats.

CONCLUSION - PERSPECTIVES

Un des premiers objectifs a été déjà atteint: des valeurs maximums de pression peuvent être évaluées avec une bonne précision par analyse en retour du comportement de structures fusibles simples. La prochaine étape est de multiplier les mesures et d'exploiter les signaux temporels des jauges de contrainte placées sur ces fusibles, à la fois pour confirmer ces valeurs maximums de pression et mais aussi mesurer l'évolution temporelle de la pression à différents niveaux. Ce point est clairement le problème crucial actuel qui doit être réglé pour une conception plus sûre des structures soumises aux avalanches.

Les développements de la saison suivante emploieront également le même principe pour étudier le comportement d'une structure plus réaliste. L'objectif est de s'approcher au plus près de la situation d'un vrai bâtiment. Cette structure consistera donc en une plaque de 1 m² en acier placée de manière frontale à l'écoulement sur une poutre verticale encastrée au sol. De la même façon et au lieu d'utiliser des capteurs classiques, le pied de la poutre est équipé de plusieurs jauges de contrainte. Ainsi, nous mesurerons l'effet mécanique de l'écoulement sur l'obstacle par la déformation et le mouvement de la structure et non directement à partir de mesures dans l'écoulement. Sous certaines hypothèses, une méthode équivalente sera employée pour produire par analyse en retour le profil temporel de pression qui a généré les différents signaux mesurés.

En utilisant cette nouvelle approche et en synthétisant les résultats de différentes avalanches, nous pourrons ainsi définir les caractéristiques spatio-temporelles principales des profils de pression éprouvés par un vrai obstacle soumis à une avalanche pour une utilisation future en génie civil et donc une meilleure protection des biens et des personnes.

RÉFÉRENCES

- Abah L., A. Limam and M. Dejeammes (1998): "Effects of cutouts on static and dynamic behaviour of square aluminium extrusions" *Structures under shock and impact V pp 133-142, Proceeding of the SUSI conference, Thessaloniki (Greece)*, Computational Mechanics Publications.
- Batoz J.L. & G.S. Dhatt (1990): "Modélisation des structures par éléments finis" *Volume 2 : Poutres et plaques*. Paris Hermès.
- Berthet-Rambaud, P., Y. Timsah, L. Daudeville and J. Mazars (2003): "Structural Modelling of reinforced concrete slabs subjected to falling rock impacts" *Computational Modelling of Concrete Structures. pp. 689-694*. Proceedings of the Euro-C conference, A.A Balkema Publishers.
- Faug, T., P. Lachamp and M. Naaim (2002): "Experimental investigation on steady granular flows interacting with an obstacle down an inclined channel: study of the dead zone upstream from the obstacle" *Natural Hazards and Earth System Sciences. Vol. 2. pp. 187-191*.
- Issler, D. ed. (1999): "European Avalanche test sites, overview and analysis in view of coordinated experiments" *Eidgenössisches Institut für Schnee und Lawinenforschung, Mitteilungen N°59*, pp. 13-21 Davos.
- Lang, T. & R.L. Brown (1980): "Snow avalanche impact on structures" *J. Glaciol.*, **25**(93), pp. 445-455.
- Langseth, M. & O.S. Hopperstad (1996): "Static and dynamic axial crushing of square thin-walled aluminium extrusions" *Int. J. Impact. Engng.* Vol 18 Nos 7-8 , pp 949-968.
- Lindholm, U.S., R.L Bassey & G.V. Smith (1971): "Effects of strain rate on yield strength, tensile strength and elongation of three aluminium alloys" *J.Mater., JMLSA 1-971.6*(1), pp. 119-133.
- McClung, D. & P. Schaerer (1993): "The avalanche handbook" The mountaineers, Seattle, 271 p.
- Marco O. (1994) : "Instrumentation d'un site avalancheux" *Ph.D. thesis*, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.