



Pôle Grenoblois d'études et de recherche
pour la Prévention des risques naturels

Octobre 2003

Rapport sur le projet :

Quantification de la sollicitation avalancheuse par analyse en retour du comportement de structures métalliques

*Programme de recherche 2002 financé
par le Conseil Général de l'Isère*

Ph. Berthet-Rambaud^{1,3,4} (tel: 07-76-76-28-26, mel: philippe.berthet-rambaud@cemagref.fr)
**A. Pierron^{1,2}, R. Courtet², J. Lorentz³, A. Limam², J-M. Taillandier¹, T. Faug¹,
F. Nicot¹, J. Mazars³, L. Daudeville³**

Plate-forme de recherche "Risques Naturels & Vulnérabilité des Ouvrages"

- 1 : UR ETNA, Cemagref Grenoble
- 2 : URGC INSA, Lyon
- 3 : R&V, Laboratoire 3S, Grenoble
- 4 : CETE-LRPC, Lyon



Avalanche du 14-01-2003



RÉSUMÉ

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 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

SOMMAIRE

1	<i>Introduction</i>	5
2	<i>Etat des connaissances sur la sollicitation avalancheuse</i>	7
2.1	Vitesse, densité et pression...	7
2.2	Répartition spatiale de la pression	8
2.2.1	La pression fonction de la structure de l'écoulement	8
2.2.2	Superposition et coexistence des couches	10
2.3	Interaction avec l'obstacle	11
2.4	Evolution temporelle de la pression	13
2.5	Evaluation quantitative de la pression	14
2.5.1	Intensité de la pression en régime permanent	14
2.5.2	Direction de la sollicitation	16
2.6	Une sollicitation avalancheuse encore très mal connue	17
3	<i>Le site expérimental et les avalanches du Lautaret</i>	18
3.1	Situation	18
3.2	Historique	19
3.3	Les équipements disponibles	20
3.4	Les avalanches du site du Lautaret	21
4	<i>Expérimentations prévues sur le site du Lautaret</i>	23
4.1	Préambule	23
4.2	Principes de mesures	23
4.3	(Micro)-Structures fusibles en aluminium	25
4.3.1	Objectif	25
4.3.2	Description des micro-structures fusibles	25
4.3.3	Caractérisation du matériau aluminium	29
4.3.4	Modélisation du comportement des fusibles	31
4.3.5	Validation	33
4.3.6	Exploitation des déformations des fusibles	39
4.3.7	Conclusion	41
4.4	(Macro)-Structure "plaque"	42
4.4.1	Objectif	42
4.4.2	Description de la structure plaque	42
4.4.3	Etude numérique de la structure	45
4.4.4	Analyse en retour – exploitation des résultats	49
4.4.5	Conclusion	52
5	<i>Expérimentations 2002-2003</i>	53

5.1	Le dispositif finalement mis en place	53
5.2	Avalanches déclenchées et expérimentations 2002-2003	54
5.3	Profils de pression obtenus	56
5.4	Conclusion	58
6	<i>Perspectives : saison 2003-2004 et suivantes</i>	59
6.1	Couloir n°2 - fusibles	59
6.2	Couloir n°1 – structure plaque	62
6.3	Sécurité	62
6.4	Prises de vue	62
6.5	Couloir Nord-est	63
7	<i>Conclusion</i>	66

1 INTRODUCTION

Comme nous pouvons régulièrement le constater chaque hiver, les phénomènes avalancheux restent une menace bien réelle pour tous les enjeux en zone de montagne (McClung et Schaerer, 1993). Avec le développement des zones habitées mais aussi le maintien hivernal d'un réseau étendu d'infrastructures et d'équipements à des altitudes élevées, la gestion de ce risque devient une priorité s'inscrivant dans les problématiques plus larges de sécurité publique et d'aménagement du territoire.

Cette gestion qui vise à diminuer le risque passe notamment par une meilleure évaluation de la vulnérabilité des zones concernées pour adapter ensuite les mesures de protection à mettre en œuvre et notamment la construction d'ouvrages de protection adéquats.

Dans ce contexte, la plate-forme de recherche RNVO (Risques Naturels et Vulnérabilité des Ouvrages) regroupe notamment différents partenaires intervenant plus particulièrement sur la question des ouvrages soumis aux avalanches :

- ✂ UR ETNA, Cemagref Grenoble
- ✂ URGC, INSA, Lyon
- ✂ R&V, Laboratoire 3S, Grenoble
- ✂ CETE-LRPC, Lyon

L'objectif de cette collaboration est d'améliorer la conception de ces ouvrages pour leur permettre de correctement jouer leur rôle pour une meilleure sécurité. En effet, aujourd'hui un certain nombre d'outils et de méthodes performants ont été développés pour concevoir et construire mieux les ouvrages de génie civil, dans des contextes et selon des spécifications de plus en plus strictes, en utilisant par exemple la méthode des éléments finis couplée à des modèles évolués de comportement des matériaux (Berthet-Rambaud et al, 2003). Ces progrès ouvrent notamment des perspectives pour la modélisation et le calcul d'ouvrages à géométries complexes, tridimensionnelles en tenant compte du comportement réel du matériau mais aussi sous des actions complexes sur le plan de la répartition spatiale et temporelle de la charge (comportement dynamique de la structure). Pour utiliser au mieux le potentiel de ces outils, la connaissance des caractéristiques de l'action reste cependant 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 a conduit à l'utilisation actuelle de la pression statique équivalente pour concevoir les infrastructures soumises aux avalanches. Bien sûr, cette approche a pu

largement faire ses preuves pour une conception globalement sûre des ouvrages et n'a donc pas forcément poussé à approfondir plus loin la connaissance de l'impact d'une avalanche et de l'interaction avec un obstacle. Simplement et dans le contexte actuel de la gestion du risque, il ne s'agit plus aujourd'hui de se contenter de telles méthodes d'autant plus 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.



Dent déflectrice endommagée à Taconnaz – 02/1999

Le projet présenté dans ce rapport vise donc à améliorer la connaissance de cette sollicitation de manière originale et performante pour finalement contribuer et consolider les bases de toutes les études d'endommagement ou de vulnérabilité structurelle dans le domaine paravalanche afin d'éviter la destruction totale ou partielle d'ouvrages, comme ce fut le cas pour les dents déflectrices du dispositif paravalanche de Taconnaz (Haute Savoie).

L'objectif de cette étude expérimentale en partie financée par le Pôle Grenoblois d'études et de recherche pour la prévention des Risques Naturels 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.

2 ETAT DES CONNAISSANCES SUR LA SOLLICITATION AVALANCHEUSE

La connaissance des caractéristiques de l'impact d'une avalanche sur un obstacle rigide est encore très partielle et de toute façon bien en deçà des capacités des outils de calcul de structures disponibles actuellement. Pour ce qui nous intéresse à savoir la répartition spatio-temporelle de la pression sur l'obstacle au cours du passage de l'avalanche, peu d'éléments sont finalement disponibles pour exhiber des profils fiables utilisables ensuite en conception génie-civil.

2.1 Vitesse, densité et pression...

La pression est le paramètre crucial pour notre contexte. Il s'agit bien de la pression engendrée par l'avalanche contre l'obstacle et pas simplement la pression au sein de l'écoulement.

En pratique, si ce paramètre peut être mesuré, il réside cependant un certain nombre de difficultés. En effet, il faut déjà disposer d'un site expérimental suffisamment aménagé et du matériel adéquat pour permettre ces mesures: moins d'une dizaine de ces sites existent pour l'instant dans le monde. Ensuite, il faut disposer d'avalanches. Or, si celles-ci peuvent être déclenchées artificiellement, il faut quand même que la réserve de neige dans la zone de départ ait pu s'accumuler ou se renouveler suffisamment, ce qui limite aussi le nombre d'expériences. Enfin, étant donné l'intensité et la complexité des phénomènes en jeu, il reste à obtenir des mesures avec suffisamment de données significatives et fiables pour obtenir les profils souhaités. Autant de difficultés qui font qu'actuellement, le volume de données directement disponibles reste faible.

En théorie, la pression exercée sur l'obstacle peut également être obtenue à partir de la connaissance de la vitesse et de la densité. Or, la modélisation numérique des écoulements n'est pas encore suffisamment développée et validée en particulier dans le cas de la présence d'un obstacle pour permettre d'obtenir ces informations par ce biais là. Par la mesure in situ, le problème est donc le même avec en plus la nécessité de connaître l'évolution des deux paramètres simultanément de manière suffisamment fine pour aboutir à la pression qui nous intéresse, à la fois dans son évolution spatiale et temporelle.

Globalement, la connaissance des avalanches de neige reste donc encore tout à fait partielle et ne permet d'avoir qu'une connaissance imparfaite de la sollicitation qui peut être exercée sur un obstacle. Les paragraphes suivants essaient ainsi d'en présenter les éléments pratiques les plus importants pour le concepteur en génie-civil.

2.2 Répartition spatiale de la pression

2.2.1 La pression fonction de la structure de l'écoulement

Une avalanche peut être constituée de plusieurs couches en fonction des conditions et des caractéristiques de la neige concernée. Ces couches ont elles-mêmes chacune leurs propriétés propres. Or, la pression dépendant à la fois de la densité (qui est plutôt plus élevée à la base de l'écoulement) et de la vitesse (qui en revanche est plutôt plus faible à la base de l'écoulement), la question de la répartition spatiale n'est pas triviale et la pression dans la direction normale à l'écoulement va évoluer sur l'épaisseur en fonction du type d'avalanche.

Pour illustrer ce point, nous proposons ici de reprendre la description de l'avalanche de (Norem 1990) comme une superposition de couches rapportées aux différents modes d'écoulement. Le profil de sollicitation en résultera (sous réserve de pouvoir distinguer dans la réalité ces différentes couches).

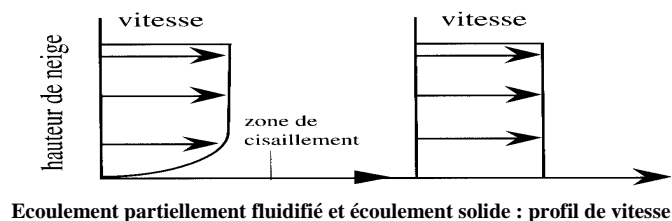
2.2.1.1 Le manteau neigeux initialement présent

La première des couches est celle du manteau neigeux présent au sol suite aux différentes chutes de neige avant l'avalanche. Elle ne fait pas à proprement parler partie de l'avalanche mais elle a cependant une influence importante dans le cas de la présence d'ouvrages: tout d'abord, en fonction de ses caractéristiques, elle contribue à alimenter et à entretenir l'avalanche. Dans ce processus, elle subit une érosion plus ou moins forte du fait des phénomènes de reprise (Hopfinger 1983). Surtout, elle va décaler verticalement la zone d'application de la sollicitation.

En revanche, ces phénomènes de reprise étant encore peu connus et difficiles à apprécier, il y a là une première difficulté à surmonter : en première approche, il pourra être considéré que l'avalanche se développe sur cette première couche et donc que la sollicitation doit être décalée verticalement d'une hauteur égale à l'épaisseur du manteau neigeux présent avant l'avalanche (si tant est qu'on puisse le connaître...). A noter que cette couche peut être fortement modifiée à l'amont immédiat de l'obstacle au cours de l'avalanche par le dépôt et la zone morte qui peut s'y créer (Cf. partie suivante sur ce point).

2.2.1.2 La couche dense

La couche qui constitue la "base" de l'avalanche est la couche dense coulante : L'écoulement de la neige se fait en suivant la topographie à une vitesse dépassant rarement les 100 km/h et plus souvent de l'ordre de la dizaine de mètres par seconde. Les qualités de neige rencontrées dans ce type d'écoulement peuvent être très variables : neige sèche, légèrement ou fortement humide. Ainsi, la neige en mouvement peut se présenter sous la forme de grains, de pâtes, de boules ou de mottes de neige. De plus le type de neige peut évoluer surtout si la zone de développement présente une grande dénivellation. On distingue finalement deux familles d'écoulements denses (Ancy 1996) : les écoulements partiellement fluidifiés (avec une zone de cisaillement intense à la base) et les écoulements solides qui se traduisent respectivement par les profils de vitesses suivants sur la hauteur de la couche. Les travaux de (Dent & al. 1998) apportent les arguments expérimentaux correspondants.



Cette hauteur de couche dépend quant à elle du volume de neige en jeu, des conditions de site et de neige. L'ordre de grandeur est de quelques mètres d'épaisseur avec des densités qui peuvent être relativement importantes (quelques centaines de kg par m^3).

Finalement, pour revenir à la sollicitation engendrée par cette couche dense, un terme de type hydrostatique indépendant de la vitesse peut être à prendre en compte. Cette pression est proportionnelle à ψgh par l'intermédiaire de différents coefficients intégrant notamment la friction de la neige et la pente. En revanche, le terme lié aux effets de bords proposé par (Norem 1990) ne paraît pas forcément d'une utilisation évidente pour nos calculs.

En général et faute de pouvoir connaître tous ces éléments, le profil le plus simple de sollicitation se limitera à une sollicitation constante sur la hauteur de la couche (écoulement type solide avec une densité homogène). Si une précision plus fine s'avère envisageable et pertinente, ce profil pourra être amélioré en prenant en compte le terme de pression hydrostatique, en considérant la zone de cisaillement à la base de la couche ou encore avec une répartition non homogène de la densité.



Avalanche de neige dense



Avalanche aérosol à Pralognan (73)

2.2.1.3 L'aérosol

La couche suivante correspond au deuxième grand type d'écoulement avalancheux : l'aérosol. C'est un écoulement très rapide (jusqu'à 100 m/s) sous la forme d'un nuage résultant du mélange de l'air et de particules de neige et composé de grandes bouffées turbulentes qui dévalent la pente. Ainsi, s'il fallait faire une analogie hydraulique, la couche dense correspondrait plutôt à l'écoulement laminaire alors que l'aérosol aurait un écoulement turbulent.

L'écoulement n'est ici pas astreint à suivre le relief. Sa puissance peut également être extrêmement variable allant jusqu'à raser des forêts entières. A noter la présence à l'avant du fameux "souffle" de l'avalanche : si ses conséquences et son rôle ne semblent pas toujours

faire l'unanimité, sa pression est relativement faible (de l'ordre de 5 kN/m² (Ancey 1996) pouvant déjà provoquer quelques dégâts) par rapport à celle de l'aérosol proprement dit.

La formation de ces aérosols est également méconnue sachant que le phénomène n'apparaît pas dès le déclenchement de l'écoulement (encore de type coulant) mais une fois que l'avalanche a atteint une certaine vitesse par mise en suspension de particules de neige au niveau du front. De ce fait, des avalanches purement aérosols (du déclenchement à l'arrêt) ne peuvent exister.

L'ordre de grandeur de la hauteur est ici de plusieurs dizaines de mètres avec un accroissement au cours de la progression pouvant atteindre des dimensions spectaculaires. Il semble par ailleurs établi que la densité est plus forte à la base de la couche (Béghin & Olagne 1991) tout en étant beaucoup plus faible (de l'ordre de la dizaine de kilos de neige par m³ au sein du nuage) que pour la couche dense.

Pour ce type d'écoulement, la sollicitation générée est encore plus méconnue. En l'état actuel des connaissances, nous retiendrons surtout que l'énergie de la couche aérosol est concentrée à sa base (Norem & al. 1985) avec une décroissance forte de la sollicitation au-dessus.

2.2.2 Superposition et coexistence des couches

Une couche intermédiaire entre la couche dense et la couche aérosol est également parfois utilisée (Schaerer & Salway 1980) (Norem 1990) (Nishimura & al. 1993) sans toutefois faire l'unanimité. Son rôle n'est pas forcément très clair puisque certains lui attribuent la même capacité que l'aérosol à dépasser la couche dense alors que d'autres la considèrent comme une couche de saltation, transition entre les couches dense et aérosol pour gérer les phénomènes de reprise.

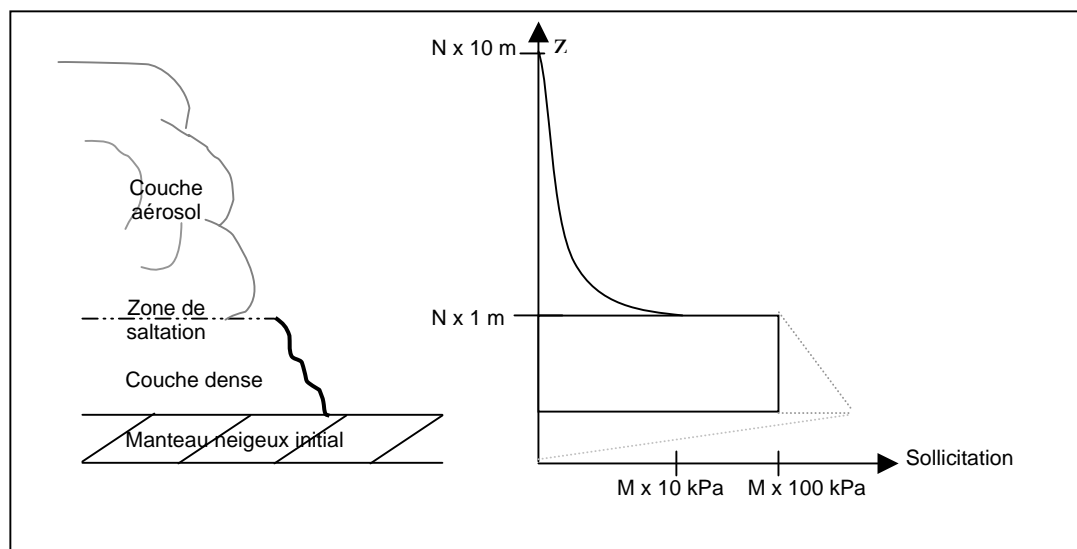


Schéma récapitulatif : profil moyen de pression (N et M de 1 à 10)

La situation se complique encore avec le problème de la coexistence des deux principales couches dense et aérosol : en effet et en fonction des conditions, l'avalanche peut être constituée uniquement d'une couche dense (neige plutôt humide ou neige sèche avant la formation de l'aérosol). Fréquemment, l'avalanche sera de type mixte avec effectivement une

couche dense et une couche aérosol liées. Les phénomènes de grande ampleur sont d'ailleurs souvent des avalanches mixtes.

Or, du fait des différences de vitesse et de caractéristiques, la partie aérosol pourra finir par devenir autonome et se détacher de la partie dense : l'avalanche se scindera alors en une partie dense et une partie aérosol indépendantes ayant éventuellement des trajectoires différentes et de toute façon décalées dans le temps (Ancey 1996) ! Pour compliquer encore, la couche dense peut être animée de vagues successives arrivant sur l'obstacle (Qiu & al. 1997).

Dans ces conditions, des hypothèses seront donc nécessaires pour choisir le type de sollicitation s'appliquant sur un obstacle et finalement distinguer les différents "fronts" pouvant l'atteindre : profil dense, aérosol¹, ou mixte avec possibilité de scénariser une succession d'écoulements différents.

A noter pour terminer que les éléments précédents concernent la répartition de la sollicitation sur une verticale correspondant a priori au centre de l'écoulement. En revanche, il n'a pas pu être trouvé d'information sur la répartition transversale de cette sollicitation et d'autres hypothèses devront être posées par exemple par rapport aux dimensions respectives de l'écoulement et de l'obstacle : sollicitation transversalement uniforme pour les petits obstacles ou selon une loi de variation à convenir...

Globalement et sur une verticale, le profil moyen de pression serait ainsi décroissant du haut vers les bas (McClung & Schaefer 1985) mais avec les différents types d'écoulement existants et la complexité des phénomènes, il est difficile d'exhiber une forme générale unique.

2.3 Interaction avec l'obstacle

Comme évoqué précédemment, l'avalanche peut être constituée de couches superposées qui peuvent aussi se séparer : l'éventuel obstacle subissant cette avalanche pourra donc être sollicité par plusieurs fronts distincts. Dans cette partie, il s'agit d'apporter quelques éléments sur la difficile question de l'interaction entre un de ses fronts et un obstacle.

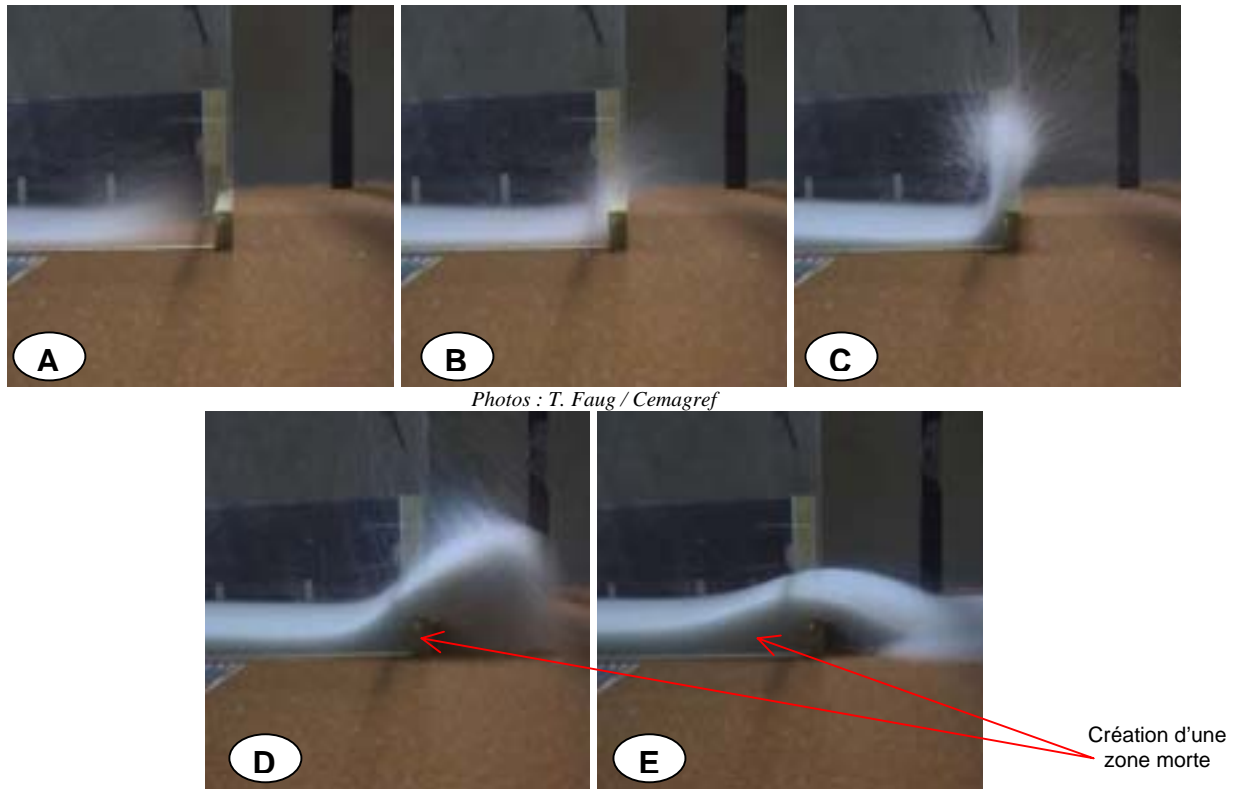
Si l'écoulement applique effectivement une sollicitation sur l'obstacle, la présence de celui-ci implique également une modification des caractéristiques de l'écoulement : trajectoire, "organisation" interne en couche, vitesse... d'où une évolution de la sollicitation... Pourtant, cette influence mutuelle n'a été que peu étudiée et si des travaux (Faug & al. 2001) sont en cours au Cemagref de Grenoble, ils restent encore assez restrictifs (écoulements granulaires en canal à échelle réduite pour déterminer l'influence de la présence d'un obstacle) et n'ont pas pour vocation d'aborder ce problème dans son ensemble.

Quelques travaux ont quand même abordés ce sujet de l'évolution temporelle de l'action : (Scheerer & Salway 1980) (McClung & Schearer 1985), (Norem & al 1985) (Dent & al. 1998) (Schaefer & Issler 2001) pour les expérimentations sur neige, (Keller & al. 1998) pour les expérimentations avec balles de ping-pong permettant de s'approcher des conditions d'un écoulement granulaire, (Pedersen & al 1979) et (Lang & Brown 1980) pour des simulations numériques d'avalanches. Tous ces travaux ne concernent que des écoulements denses et

¹ Sous-entendu initié par un écoulement dense mais qui n'atteindra pas forcément l'obstacle considéré.

aucun élément n'a pu être trouvé sur les aérosols hormis les travaux de Pierre Béghin (Auge 1995) mais qui ne renseignent pas sur la sollicitation engendrée.

Un des phénomènes importants se produisant à l'interface écoulement-obstacle est la création d'une zone de stagnation ou zone morte. Pour l'illustrer, les clichés ci-dessous ont été pris lors d'un lâcher de 15 kilos de billes de verre de 1 mm de diamètre dans un canal large de 20 cm et barré par un obstacle de 2 cm de haut. En réalité, le canal est incliné d'une trentaine de degrés.



La photo A correspond à l'arrivée de l'écoulement dont on peut supposer qu'il a la structure en couches exposée précédemment. Cette structure est encore présente lors de la photo B correspondant au moment où l'écoulement frappe de plein fouet l'obstacle avec un fort effet dynamique. Les photos B et C montrent ensuite "l'éclatement" du jet au-dessus qui s'accompagne d'une modification des caractéristiques géométriques à l'amont de l'obstacle avec la création et l'accroissement d'une zone morte. Enfin, l'écoulement reprend un régime plus calme, l'obstacle étant en partie gommé par cette zone morte.

Cette interaction écoulement-obstacle va donc se traduire par une réorganisation complète de la structure de l'écoulement mais aussi par une modification des conditions à l'amont de l'obstacle. Ainsi, en plus de la question du profil spatial de pression potentiellement engendré par une structure d'écoulement (Cf. point précédent), il faut également s'intéresser à l'évolution temporelle de cette pression qui pourra engendrer d'éventuels phénomènes dynamiques sur l'obstacle.

2.4 Evolution temporelle de la pression

Faute de références dans ce domaine, cet aspect n'est traité ici que pour les écoulements denses. Comme l'illustre le point précédent, le profil de pression proposé au 2.2.1.4 ne peut être valable qu'au moment de l'impact. En imaginant un profil de pression relativement simple² (constant !) pour un écoulement dense, il s'agit donc d'en connaître l'évolution au cours du temps.

Cette évolution concerne d'une part la forme du profil et d'autre part les amplitudes des pressions. Autant dire que le premier point est encore loin d'être accessible et les moyens expérimentaux actuels ne permettent pas pour l'instant de répondre à ce problème de manière raisonnable. Pour le second point, un certain nombre d'éléments existent sans qu'une "doctrine" unique puisse être exhibée.

Globalement et comme l'illustrent les images successives précédentes, l'interaction entre l'écoulement et l'obstacle peut être décrite en une phase transitoire et une phase (pseudo)-permanente. Pendant cette phase permanente, la sollicitation sur l'obstacle peut être considérée comme (quasi)-permanente avec une pression stabilisée à un palier.

En revanche, les phénomènes et leurs incidences en terme de pression et de sollicitation pendant la phase transitoire sont beaucoup moins connues alors que cette phase est prépondérante pour le comportement dynamique des structures concernées. Certains annoncent ainsi la présence d'un pic de pression avant le palier.

Les arguments pour expliquer ce pic sont divers : (McClung & Schearer 1985) l'attribue à l'impact de débris solides présents dans l'écoulement, à des pic de densité ou de vitesse ou à la combinaison de ces effets. Dans ces conditions, il n'y aurait pas de règle pour positionner le pic au cours de l'écoulement.

Or, la plupart des autres travaux expérimentaux montrent un pic plutôt au début de l'écoulement alors que d'autres ne montrent pas spécialement de pic. Dans cette optique, la différence de temps entre le début du contact et l'apparition du pic de sollicitation peut également s'expliquer par des formes différentes de front. Par exemple, un bourrelet comme celui observé à l'avant de l'écoulement lors des lâchers de balles de ping-pong sur tremplin de saut à ski au Japon (Keller & al. 1998) favorisera une apparition rapide du pic de sollicitation. Au contraire, la présence de la couche intermédiaire parfois évoquée ou d'une forte saltation au niveau du front diminuera l'importance de ce pic.

D'autres paramètres vont également influencer sur cette phase transitoire : écoulement naturellement canalisé qui aura tendance à ensevelir l'obstacle ou au contraire situation propice à un détournement... Ces conditions qui déterminent la formation de la zone morte vont être déterminantes.

En revanche, nous n'avons pu trouver que peu d'éléments quantitatifs quant à la vitesse de montée au pic et à l'amplitude du pic, pourtant importantes du point de vue structurel. A partir

² L'état des connaissances ne permet pas en tout état de cause d'aller plus loin pour l'instant !

des enregistrements disponibles, l'ordre de grandeur des "sauts" de sollicitation semble ainsi être situé entre quelques millisecondes et un centième de secondes (Schaer & Issler 2001).

Ces valeurs ont pu être validées par les approches numériques réalisées il y a une vingtaine d'années (Pedersen & al. 1979) (Lang & Brown 1980). Ces dernières semblent également confirmer le fait que le pic de sollicitation est situé au moment où l'écoulement entre complètement en contact avec l'obstacle.

Cette partie démontre clairement les lacunes qui restent à combler au niveau de la connaissance générale de la sollicitation d'une avalanche sur un obstacle: étant donné la complexité des phénomènes en jeu, l'importance des interactions, le traitement de ce problème doit être absolument mené de manière spécifique en considérant les influences mutuelles de l'avalanche et de l'obstacle. Cette interface écoulement-obstacle reste une question très difficile de la recherche sur les avalanches mais qui est pourtant cruciale pour un dimensionnement plus sûr des structures soumises à ces phénomènes par des considérations dynamiques.

2.5 Evaluation quantitative de la pression

2.5.1 Intensité de la pression en régime permanent

A. Voellmy (dans (Voellmy 1955)) a été le premier à proposer une pression engendrée par l'avalanche proportionnelle au carré de la vitesse de son écoulement (Lang & Brown 1980). Par sa dimension, le coefficient de proportionnalité ainsi introduit est donc équivalent à une densité d'où finalement l'expression de la pression de référence la plus largement utilisée:

$$P_{ref} = \frac{1}{2} \rho V^2$$

Cette expression est déterminée par analogie hydraulique à partir de l'équation de Bernoulli moyennant certaines hypothèses et notamment en se considérant sur une ligne d'écoulement en régime permanent.

Si des résultats expérimentaux sont effectivement en adéquation avec cette formulation, certaines limites apparaissent aussi pour une utilisation "brute" dans le cas des avalanches d'autant plus qu'on n'y fait aucune distinction entre les différents types d'écoulement et surtout qu'elle ne tient par exemple pas compte de la non-permanence du phénomène.

Son application semble donc se justifier plutôt pour donner la pression "permanente" après "l'impact". Il reste cependant encore à régler le problème de la détermination et de l'évaluation de la vitesse et de la densité au sein des écoulements concernés.

A ce niveau, se pose directement la question des inhomogénéités dans l'écoulement : en plus de la possibilité d'avoir des qualités de neige et des zones de densité ou vitesse différentes, s'ajoute le problème de la présence ou non d'autres matériaux qui viendraient augmenter la densité initiale et modifier ses caractéristiques. Cette question n'est pas triviale puisque des débris forestiers ou des rochers de plusieurs tonnes peuvent être charriés dans l'écoulement et sont régulièrement retrouvés dans les zones de dépôt. (Bartelt & Stöckli 2001) introduisent même l'influence de la forêt sur l'écoulement.

Dans le cas de déclenchement glaciaire, il faut encore ajouter la présence de blocs de glace qui peut être importante (proportion estimée à 40 % à Tacconnaz (Rapin 2000)). Enfin dans le cas de zones urbanisées comme ce fut le cas pour Montroc en 1999, s'additionnent les éventuels "apports" provoqués par la destruction de biens en amont. Or, tous ces aspects sont difficilement quantifiables à l'avance et sauf à modéliser ou diagnostiquer un événement ayant effectivement eu lieu (McClung & al. 1993), ils ne sont en général pas pris en compte.

Ainsi, pour affiner les résultats obtenus à partir de la pression de référence et tenir compte de certaines de ces difficultés, des modifications ont été apportées ou d'autres approches ont été suivies qui reviennent globalement à l'introduction d'un coefficient multiplicateur supplémentaire k pour obtenir la pression de projet utilisée en expertise (Rapin 2000):

$$P = k P_{ref}$$

Ainsi, en intégrant dans le temps la pression de référence localement à partir du théorème de conservation de la quantité de mouvement, T. Nakamura utilise plutôt $P = \rho v^2$ soit $k=2$ dite "formule de référence intégrée" (Auge 1995).

D'autres comme Mellor (McClung & Schaerer 1985) estiment que la compression de la neige, particulièrement pour les avalanches de neige dense, ne peut être négligée au moment du choc et introduisent pour cela le coefficient suivant:

$$k = 2 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{0.25} \left(\frac{\psi_1}{\psi_2} \right)^{0.25}$$

où ρ_1 et ρ_2 sont respectivement les densités avant et après le choc avec la nouvelle difficulté de les estimer.

La pression varie aussi avec la forme de l'obstacle, ses dimensions et le rapport avec celles de l'avalanche. Un coefficient de traînée $C=k$ peut être ainsi introduit pour les obstacles de petites dimensions par rapport à celles de l'écoulement: il prend en compte les caractéristiques de l'écoulement sur l'obstacle (couche limite, décollement et production d'un sillage en fonction du nombre de Reynolds (McClung & Schearer 1985) et des propriétés rhéologiques du fluide).

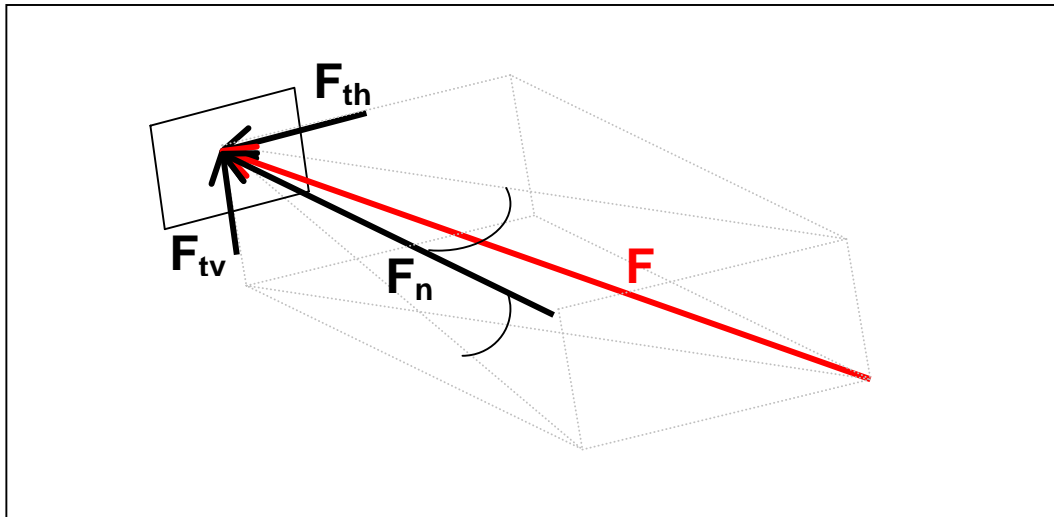
Enfin, la prise en compte du rapport R entre la hauteur de l'obstacle impacté et la profondeur de l'avalanche peut amener à certains résultats numériques (Pedersen & al. 1979) du type:

$$P = 0,2 \rho v^2 \left(\frac{C}{\gamma} \right)^{0.25} \left(\frac{6R}{4} \right)^{0.25} \quad \text{pour } R \text{ compris entre } 0.2 \text{ et } 1$$

En bref, il faut surtout retenir que la pression appliquée par un écoulement avalancheux sur un obstacle est proportionnelle au carré de sa vitesse. Le lien entre les deux est guidé par la densité de l'écoulement et un facteur correctif pour tenir compte des conditions. La valeur ainsi obtenue permet d'approcher la pression "permanente" de la sollicitation au passage de l'avalanche sur l'obstacle.

2.5.2 Direction de la sollicitation

Le paragraphe précédent traitait de l'intensité de la sollicitation dans l'axe de l'écoulement mais il faut aussi tenir compte de sa direction d'incidence pour traduire les forces qui finalement vont s'appliquer aux structures touchées. Ainsi, suivant son orientation en fonction de celle de l'obstacle, cette sollicitation va se décomposer en une composante normale, une composante tangentielle horizontale et une composante tangentielle verticale:



Décomposition de la sollicitation avalancheuse

Les angles ζ et η sont choisis ici respectivement dans le plan horizontal et vertical par rapport à la normale (indice n) à l'obstacle. F est donc la sollicitation provoquée par l'avalanche dans la direction de son écoulement. Or, l'approche qui est privilégiée pour les avalanches est de les considérer comme des fluides avec une sollicitation dépendant de la vitesse. Dans ces conditions et pour obtenir les différentes composantes, il ne s'agit pas de projeter directement F mais bien la vitesse V. En supposant F de la forme $F \propto V$, on obtient donc $F_n \propto (V \cdot \cos \zeta \cdot \cos \eta)$.

Pour les sollicitations tangentiels, il faut en plus introduire le coefficient de frottement f à l'interface écoulement-obstacle ce qui permet d'écrire $F_t = f \cdot F_n$. Certaines valeurs de f existent dans la littérature (Auge 1995) mais avec des plages de variations larges qui nécessiteraient d'être affinées notamment par rapport aux qualités de neige, aux matériaux de construction classiques et pour tenir compte au mieux des effets dynamiques. Ainsi, les propositions suisses de 1990 (Rapin 2000) proposent un coefficient de frottement statique compris entre 0,3 et 0,4 alors qu'on trouve des exemples jusqu'à 0,6 (Lang & Brown 1980).

Par ailleurs, le fait que l'obstacle puisse être submergé au cours de l'écoulement, que le régime soit non permanent ou qu'il puisse se créer des modifications topographiques autour de l'obstacle (phénomène de coin, zone morte (Chu et al, 1995)) va avoir une influence sur l'évolution des sollicitations et notamment sur les efforts tangentiels. A noter aussi que dans l'état actuel des connaissances et pour les configurations habituelles, la sollicitation tangentielle verticale n'est en général pas prise en compte même si elle peut être significative.

2.6 Une sollicitation avalancheuse encore très mal connue

La connaissance des caractéristiques de l'impact d'une avalanche sur un obstacle rigide est encore très partielle et de toute façon bien en deçà des capacités des outils de calcul de structures disponibles actuellement. Pour ce qui nous intéresse, à savoir la répartition spatio-temporelle de la pression sur l'obstacle au cours du passage de l'avalanche, la littérature contient effectivement un certain nombre de travaux faisant référence à différentes expérimentations depuis les années 60. Cependant, la qualité de ces résultats reste trop variée pour pouvoir en tirer des éléments suffisamment solides.

En effet, la sollicitation engendrée par l'interaction d'une avalanche avec un obstacle est un problème complexe dépendant de nombreux paramètres. A partir de la pression de référence $\frac{1}{2}\rho v^2$, il faut tenir compte à la fois du profil de répartition spatiale de l'action en fonction de la typicité de l'écoulement concerné mais aussi de son évolution temporelle pour pouvoir intégrer les aspects dynamiques sûrement importants de ces phénomènes.

Une autre difficulté est de mener correctement et proprement des expérimentations sur une avalanche et les mesures disponibles restent finalement peu nombreuses ou incomplètes. En ajoutant à cela les incertitudes liées aux modes de mesure, leur fiabilité doit aussi être vérifiée. On peut notamment citer les limites liées à l'utilisation (pourtant fréquente) de capteurs de pression : la première est souvent un parasitage des résultats lié à la présence d'hétérogénéités dans l'écoulement mais également au rapport entre les dimensions des capteurs utilisés et celles de ces hétérogénéités.

Il faut également souligner que les mesures disponibles sont souvent faites dans des conditions les moins perturbatrices possibles : la présence d'un obstacle, l'influence de sa géométrie et l'interaction mutuelle avec l'écoulement (création d'une zone morte à l'amont par exemple) ne sont donc de fait pas prises en compte alors que la pression finalement engendrée en dépend forcément. Les pressions mesurées ne sont donc pas forcément celles que subirait un obstacle au même endroit !

Ainsi, aussi bien d'un point de vue qualitatif (formes des profils spatio-temporels avec la présence ou non de pics d'impact) que quantitatif (validité des formules analytiques permettant d'obtenir la pression en fonction de la densité et de la vitesse), un certain nombre de points doivent être fiabilisés pour valider les caractéristiques de base de l'action d'une avalanche sur un obstacle.

Ce projet s'intègre donc dans l'organisation d'une nouvelle campagne expérimentale de mesure de la pression d'une avalanche sur le site du Cemagref au Col du Lautaret. L'objectif final en est l'obtention de profils spatio-temporels fiables de la pression générée par une avalanche sur un obstacle. A noter que ces profils doivent être réalistes et utilisables pour la conception en génie-civil d'ouvrages soumis aux avalanches.

3 LE SITE EXPÉRIMENTAL ET LES AVALANCHES DU LAUTARET

3.1 Situation

Ce site expérimental est situé à une centaine de kilomètres de Grenoble dans les Hautes-Alpes entre le col du Lautaret et le col du Galibier. Il est utilisé depuis plusieurs dizaines d'années par le Cemagref, pour étudier sur le terrain la dynamique des avalanches et les technologies de déclenchement artificiel. Ce site a été choisi car les zones de départ sont accessibles à ski depuis une route dans de très bonnes conditions de sécurité vis-à-vis des avalanches. Il s'étale le long de la montagne de Chaillol.



La montagne de Chaillol

La face sud-est de la crête de Chaillol (2 637 m) est sillonnée par sept couloirs rectilignes et prononcés, sujets à de nombreux écoulements avalancheux coupant la route du Galibier fermée en hiver. Sur la face Nord-Est, se trouve également un couloir d'avalanche. La situation géographique du site du Lautaret lui confère un enneigement abondant. Par ailleurs, l'accès par la RN91 dont le déneigement, maintenu au cours de la période hivernale, est quasiment toujours assuré et l'absence d'enjeux dans le voisinage permet de pouvoir y mener des expérimentations dans le domaine du déclenchement et de la dynamique des avalanches sans contraintes fortes³. L'ensemble de ces avantages a donc guidé ce choix d'utiliser ce site existant pour ce projet.

³ Un PIDA spécifique s'applique au site qui gère notamment l'évacuation de la zone (randonneurs, kite-surfers...) et la coupure momentanée de la Route Nationale. Par ailleurs, les opérations sont menées sous la direction d'un Directeur des Opérations extérieur (actuellement, M. Le Directeur des Pistes de la station de Serre Chevallier)

3.2 Historique

Le site expérimental du Lautaret a été équipé à l'origine par la division Nivologie du Cemagref. Il a été utilisé de 1972 à 1981 puis depuis 1991.

Entre 1972 et 1981, de nombreuses expériences ont été réalisées tandis que l'équipement du site était développé.

Un premier Catex sommaire, en boucle sur trépieds avec déclenchement du couloir Nord-Est, est installé, ainsi qu'un premier petit téléphérique de service depuis la route du col et deux abris de chantier (groupe électrogène et mesures). Des supports de capteurs posés et ancrés au niveau de la route sont construits pour l'étude des couloirs 1, 2 et Nord-Est. Les supports du couloir Nord-Est sont détruits par une grosse avalanche.

Un deuxième Catex avec pylônes Schippers est construit, ainsi qu'un nouveau téléphérique de service. Des travaux de terrassement sont réalisés pour permettre la pose en souterrain des lignes de transmissions des données sur 4 couloirs.

Le Cemagref travaille activement avec l'équipe ASP (laboratoire d'Applications Spéciales de la Physique) du CEA (Commissariat à l'Energie Atomique). C'est l'époque des rapports Dynaneige, des essais de tirs de mortier, de la mise au point de l'avalancheur et des différentes munitions jusqu'aux obus flèches et radar, de la mise au point du système de mise à feu par câbles, de différents descendeurs, de la reprise de la technique de stéréo photo, etc.

Mais ces équipes rencontrent des problèmes de maintenance du site car il faut procéder au montage chaque automne des supports capteurs et au démontage au printemps suivant, sur instruction de la DDE 05 avant ouverture de la route du Galibier.

A partir de **1981**, par manque de moyens, l'exploitation pratique du site est arrêtée, la division se concentrant sur la modélisation numérique des avalanches. Seules des opérations de maintenance du Catex et du téléphérique sont réalisées.

Il sera relancé à partir de **1991** avec les moyens du bord : construction sur un socle de béton d'un support de capteurs en forme d'aile d'avion pour ne pas perturber l'écoulement des avalanches. Et de nouveaux déclenchements, de nouvelles tentatives de mesures ont lieu: ultrasons, pièges à neige, cordes vibrantes, chapelets de billes, traitement d'images vidéo....

Le 14 mars 1995, un accident heureusement sans gravité se produit : quatre personnes sont submergées par un écoulement dense (250 kg) et rapide (25 m/s). Tout le matériel de mesures et le support sont détruits. Seul le socle résiste.

Suite à cet événement, un plan d'investissement sur 3 ans est décidé. Le développement du site continue alors : installation d'un Gazex au sommet du couloir n°2. Ce couloir instrumenté a été équipé d'un support de capteur et d'un abri en béton armé situé à 15 m en rive gauche. Cet abri possède une ligne de courant et une ligne téléphonique.

Plusieurs tirs ont été réalisés au cours de l'hiver **1998/99** et un nouveau type de déclencheur, l'Avalhex, a été essayé et développé avec succès.

Depuis, le site expérimental du Lautaret a vu un ralentissement de ses activités.

Ce site a finalement été relancé pour la saison **2002/2003** avec une nouvelle campagne de mesures dans le cadre du présent projet.

3.3 Les équipements disponibles

Le site du Col du Lautaret comprend plusieurs couloirs d'avalanches présentant l'avantage de pouvoir être déclenchés à distance et dans d'excellentes conditions de sécurité grâce à des systèmes « gazex » et « avalhex ». Ce sont principalement les deux couloirs n°1 et 2 qui sont pressentis pour les expérimentations.



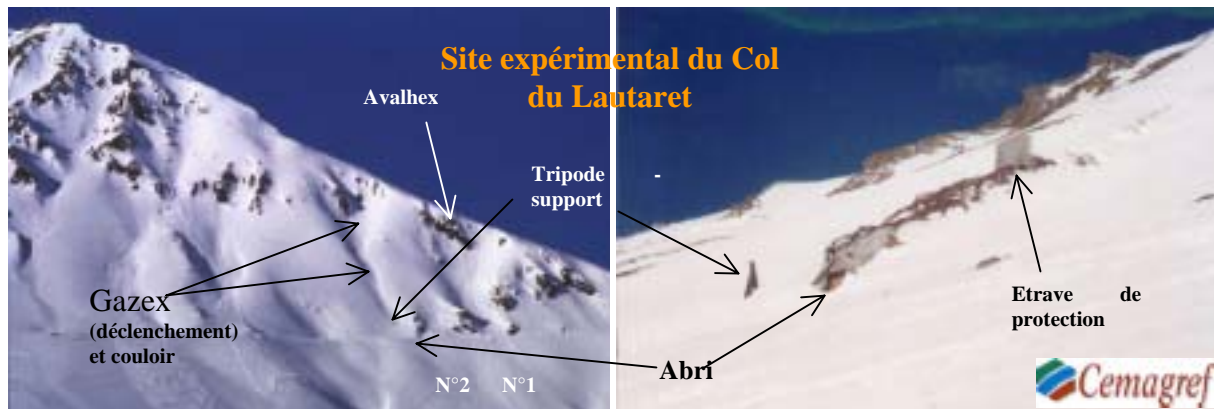
Avalhex et Gazex

Le couloir n°2 est particulièrement intéressant puisqu'il est également équipé d'un tripode support pour de futurs capteurs et d'un abri permettant l'installation d'éventuels moyens de mesure et d'acquisition (présence d'électricité et du téléphone). Cet abri permet également d'entreposer le matériel dans un lieu protégé. Le site dispose enfin de différents repères visuels permettant de mener des mesures indirectes à grande échelle par moyens vidéos.



Le tripode support (couloir n°2), l'abri et l'étrave de protection

Ces infrastructures techniques et logistiques ajoutées à l'expérience accumulée sur ce site constituent ainsi une base de départ solide pour mettre au point des expérimentations dans le contexte difficile des avalanches.

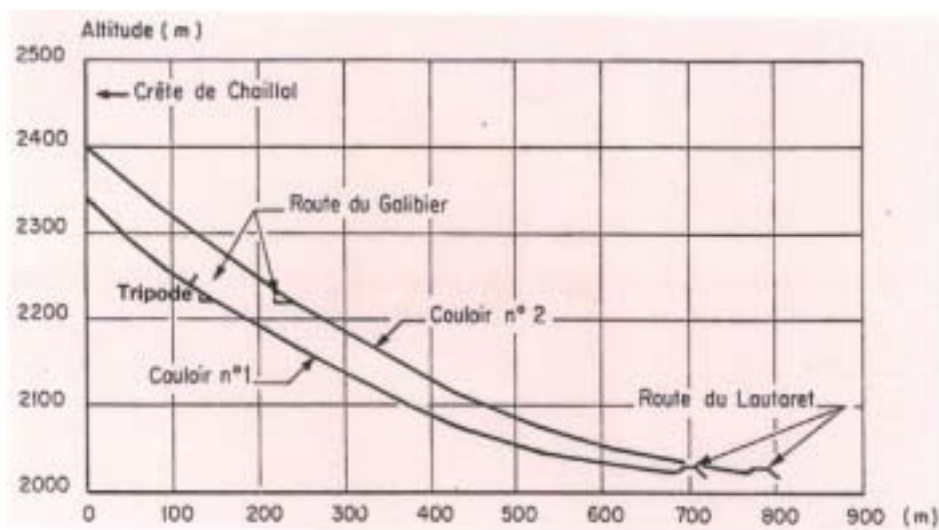


Récapitulatif des équipements et des couloirs

3.4 Les avalanches du site du Lautaret

Selon les couloirs, les altitudes de départ des avalanches sont comprises entre 2300m et 2600m. Les zones d'arrêt se trouvent vers 2100m et les pentes sont voisines de 45° dans la zone de départ et de 30° dans la zone d'écoulement.

Les profils des deux principaux couloirs n°1 et n°2 sont les suivants :

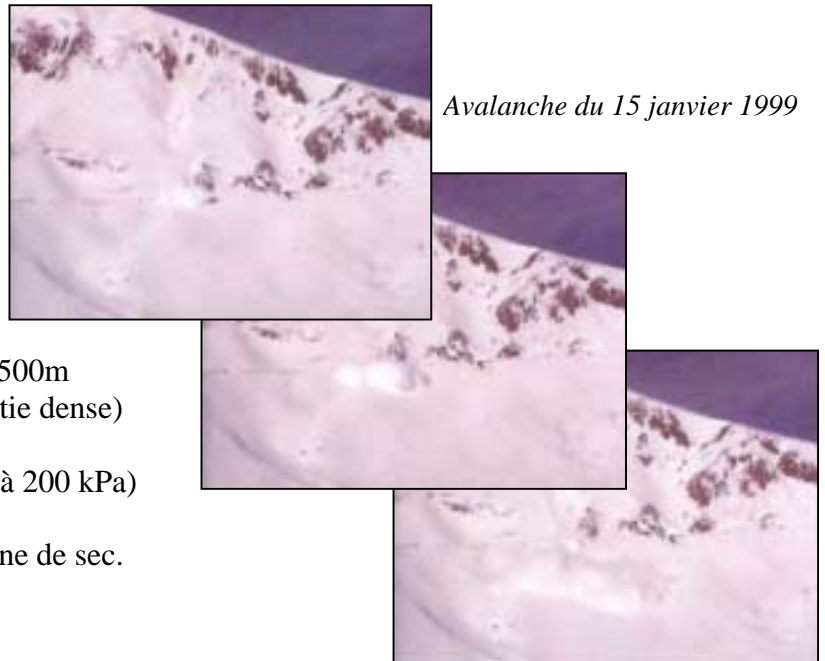


La présence de la route du Galibier qui crée un décrochage du profil à environ 2200m d'altitude peut engendrer des perturbations qui seront néanmoins négligeables si l'enneigement est abondant. Sachant que les zones de mesures seront préférentiellement situées au-dessus de cette route (principalement pour l'ancrage et l'accessibilité des installations), l'inclinaison au niveau des expérimentations est d'environ 34°.

Des données sur une vingtaine d'avalanches sont disponibles pour les déclenchements effectués dans les deux principaux couloirs (n°1 et 2).

Ces données montrent que tous les types d'avalanche (aérosols ou/et denses) peuvent être créés sur le site du Lautaret avec les caractéristiques générales suivantes :

- Longueur moyenne de parcours: 500m
- Hauteur: de l'ordre du mètre (partie dense)
- Vitesse: entre 70 et 100 km/h
- Pression mesurée: 80 kPa (jusqu'à 200 kPa)
- Volume: qq. milliers de m³
- Durée de l'écoulement: une dizaine de sec.
- Fréquence : 3 à 5 par hiver



Globalement, les avalanches du site du Col du Lautaret peuvent ainsi s'apparenter à des écoulements d'ampleur "moyenne" tout à fait représentatifs des phénomènes avalancheux. A ce niveau, il faut aussi souligner que l'interaction avec des ouvrages de protection a le plus souvent lieu dans des situations également "intermédiaires" quant à la puissance de la sollicitation (zone d'arrêt, petites avalanches...). A de rares exceptions près et par le principe même du zonage, on n'a pas ainsi à traiter de cas d'avalanches exceptionnelles plongeant sur des ouvrages rigides. Ce site paraît donc particulièrement adapté pour la problématique "ouvrage soumis aux avalanches" qui nous intéresse ici. Enfin, le fait de disposer de données sur une vingtaine d'avalanches est très précieux pour pouvoir dimensionner au mieux les nouveaux équipements et fixer les gammes de mesure.

Les mesures de pression effectuées auparavant différencient ainsi une pression moyenne et une pression maximale (liée à priori aux pics de pression). Les ordres de grandeur sont les suivants :

$$P_{\text{moy}} \text{ mesurée} = 50 \text{ kPa (jusqu'à 70 kPa)}$$
$$P_{\text{max}} \text{ mesurée} = 100 \text{ kPa (jusqu'à 200 kPa)}$$

A ce niveau, il faut également noter que les valeurs mesurées présentent une certaine variabilité. De plus, il subsiste des incertitudes quant aux modes de mesures utilisés à l'époque. En effet, la précision des capteurs dépend de leur taille par rapport à celles des hétérogénéités dans l'écoulement. Un certain nombre d'hypothèses supplémentaires a donc dû être posé pour dimensionner complètement les nouveaux dispositifs à mettre en place.

4 EXPÉRIMENTATIONS PRÉVUES SUR LE SITE DU LAUTARET

4.1 Préambule

Pour différentes raisons techniques et météorologiques, une partie des expérimentations prévues pour cet hiver 2002-2003 n'ont pu être mises en place ou ont dû être modifiées. Cependant, nous présenterons dans cette partie l'ensemble des équipements prévus sur le site qui sera pleinement opérationnel pour l'hiver 2003-2004. Nous détaillerons ensuite les mesures qui ont pu être faites en 2002-2003.

4.2 Principes de mesures

L'utilisation de capteurs (type pression, vitesse...) a pu clairement montrer ses limites. Il faut également souligner que les mesures disponibles sont souvent faites dans des conditions les moins perturbatrices possibles : la présence d'un obstacle, l'influence de sa géométrie et l'interaction mutuelle avec l'écoulement (création d'une zone morte à l'amont par exemple) ne sont donc de fait pas pris en compte alors que la pression finalement engendrée en dépend forcément. Les pressions mesurées ne sont donc pas forcément celles que subirait un obstacle au même endroit.

Or, au lieu de capteurs fournissant des mesures locales, les mesures de déformation (ou même 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.

Pour ce projet, il s'agit donc d'explorer une nouvelle approche pour la mesure de la sollicitation avalancheuse : plutôt que d'obtenir directement des données à partir de moyens d'acquisition spécialisés, l'idée est d'exploiter des renseignements obtenus indirectement grâce au comportement de structures soumises à l'avalanche. Un des aspects de cette étude est d'utiliser des structures significatives permettant également de tenir compte de l'interface écoulement-obstacle et de son influence sur la sollicitation effectivement appliquée à l'ouvrage.

L'intérêt scientifique principal et l'originalité de ce type d'approche sont donc de mesurer non pas directement les caractéristiques de l'écoulement mais plutôt ses conséquences sur des structures adaptées par analyse en retour de leur comportement.

Pour atteindre l'objectif évoqué, à savoir l'obtention de profils spatio-temporels réalistes de la pression générée par une avalanche sur un obstacle, il s'agit ainsi de disposer et d'étudier une structure réelle (ou réaliste) dans l'écoulement d'avalanche.

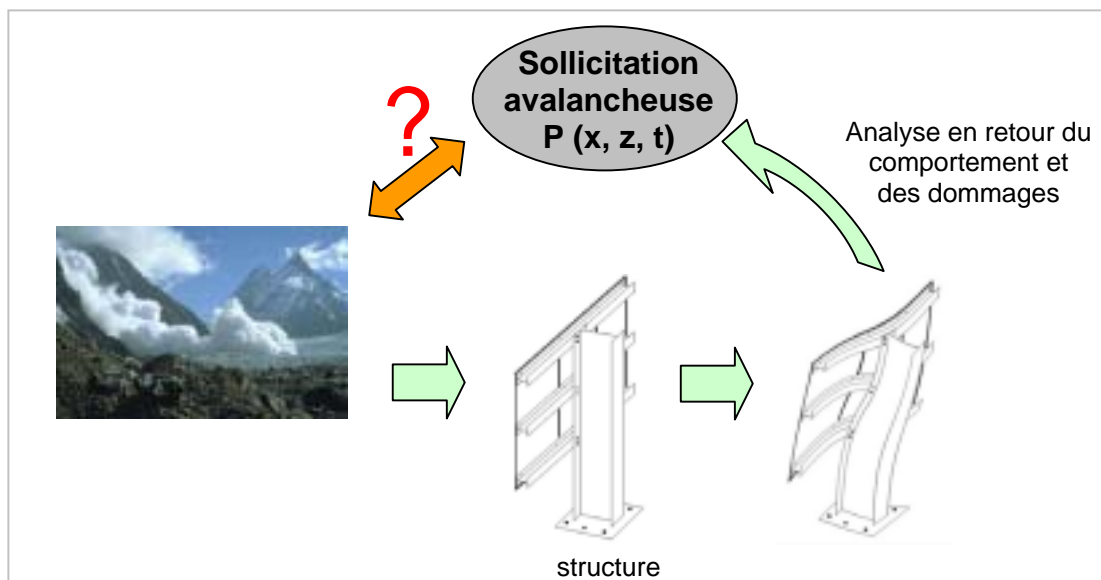
Cependant, lier ensuite quantitativement les macro-effets observés à l'action de l'avalanche est difficile du fait de la complexité des phénomènes mis en jeu. Une telle approche indirecte exige ainsi en parallèle, une étude particulière de la structure concernée pour être capable d'en simuler correctement 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 donc des structures expérimentales adaptées qui combinent la représentativité des vrais bâtiments et la simplicité afin de faciliter l'interprétation de leur comportement. 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 analyse en retour de ses conséquences sur des structures réalistes plutôt que directement par des capteurs placés directement dans l'écoulement. La structure expérimentale devient en quelque sorte un macro-capteur.



4.3 (Micro)-Structures fusibles en aluminium

4.3.1 Objectif

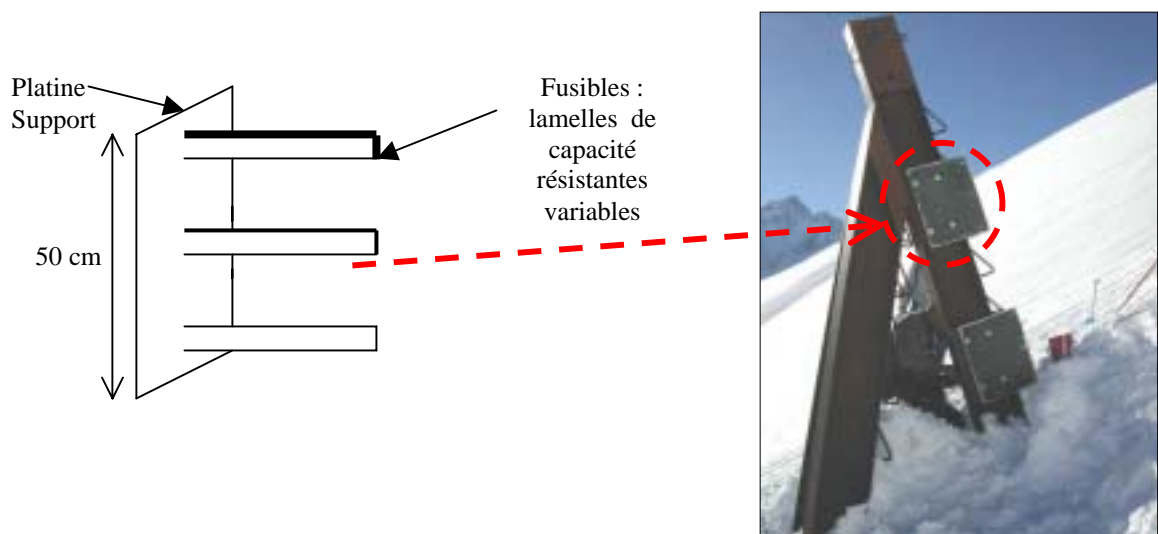
L'objectif est ici de déterminer une première information importante de la sollicitation d'une avalanche sur un obstacle à savoir le profil des pressions maximales sur la hauteur de l'écoulement. La nécessité de disposer de suffisamment de points pour pouvoir générer correctement ce profil impose de multiplier les dispositifs de mesure. Il s'agit donc de trouver le bon compromis entre simplicité, coût et qualité des résultats attendus selon les principes indiqués précédemment.

Finalement, la solution retenue est de mettre en place sur le tripode des structures fusibles en aluminium. 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. 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. Le fusible est finalement placé perpendiculairement à la direction d'écoulement de l'avalanche à différents niveaux (verticalement et horizontalement).

De plus, certains de ces fusibles sont équipés de jauges de contraintes, afin d'obtenir également l'évolution temporelle de cette sollicitation qui constitue le deuxième champ important de recherche sur la sollicitation d'une avalanche sur un obstacle.

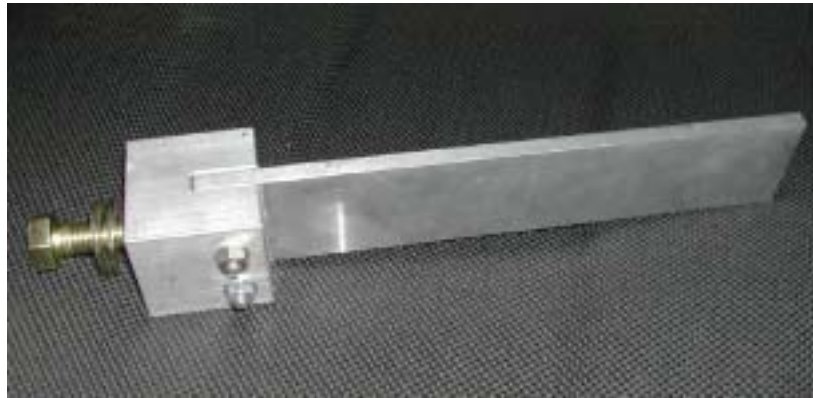
4.3.2 Description des micro-structures fusibles

L'idée des fusibles est de pouvoir disposer de moyens simples qui par les déformations qu'ils auront subies permettront de "lire" le plus directement possible la pression générée par l'avalanche à leur niveau. Le principe finalement retenu pour ces structures fusibles est celui d'une lame (ou plat) d'aluminium encastree à une de ses extrémités et qui peut donc être considérée en flexion simple (pour faciliter ensuite l'exploitation des résultats). Chacune de ces micro-structures constitue finalement en elle-même une sorte de capteur. Ces fusibles sont placés sur le tripode à l'aide de platines-support adaptées.



Des fusibles de capacités résistantes variables sont disponibles de manière à approcher le plus finement possible la pression à différents niveaux. A noter que certains des fusibles peuvent devenir "inactifs" à cause de l'accumulation de neige au cours de l'hiver. Enfin, les contraintes géométriques pour éviter l'influence mutuelle d'un fusible sur l'autre (écartement suffisant entre eux) ont été prises en compte.

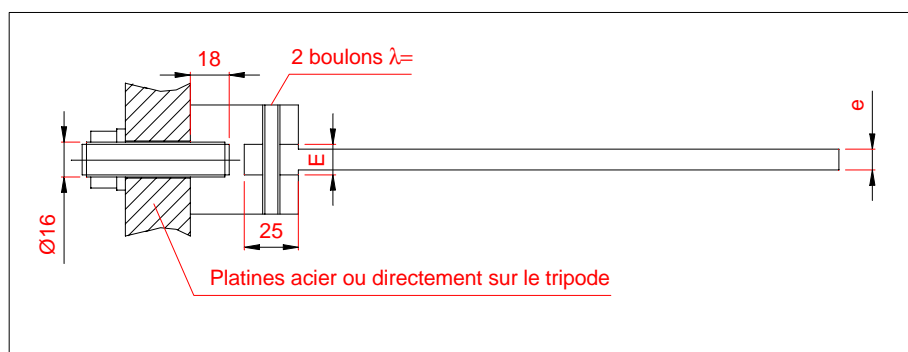
Les fusibles ont été conçus conjointement avec l'INSA de Lyon. L'ensemble fusible est constitué d'un bloc d'encastrement et d'un plat effectivement fusible le tout en aluminium 6060T5 (matériau relativement commun et peu sensible à la vitesse de sollicitation).



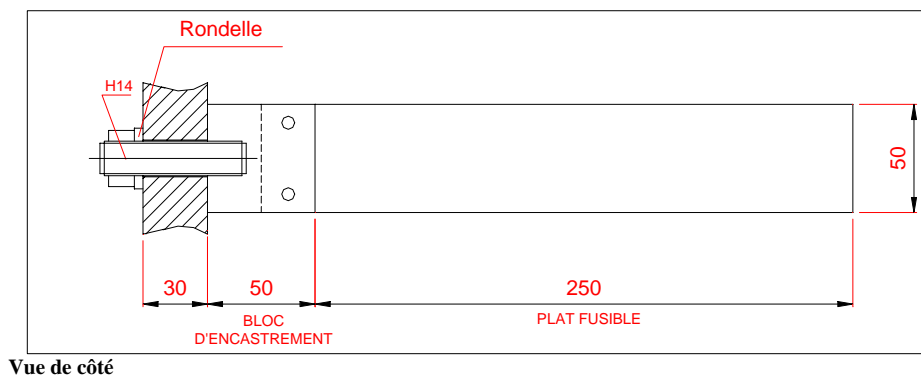
Plat fusible et bloc d'encastrement

L'avantage de ce montage est de pouvoir conserver les blocs d'une fois sur l'autre (seuls les plats sont changés) et donc de limiter les usinages. Tous les fusibles ont les mêmes dimensions, seul l'épaisseur est variable. En effet, l'idéal pour obtenir les meilleurs résultats est d'obtenir après l'avalanche des fusibles déformés à chaque niveau mais sans que les déformations ne soient trop importantes : une flexion trop forte est le signe d'un fusible mal dimensionné et son état final ne peut alors plus être représentatif de la pression générée par l'avalanche à cet endroit (on en obtient seulement alors une borne inférieure).

Les fusibles sont fabriqués directement à l'atelier du Cemagref selon les spécifications suivantes :



Vue de dessus



Les épaisseurs e disponibles varient de 3.5 mm à 11.5 mm tous les millimètres et sont obtenues à partir de barres de 6, 8, 10 et 12 mm (en choisissant l'épaisseur directement supérieure à celle du fusible projeté). Ce choix a été fait à la fois pour limiter l'usure et pour garantir l'épaisseur des fusibles avec une bonne précision (tout en évitant l'apparition de déformations lors de la fabrication). Cela nécessite donc des types de cube différents avec des largeurs de gorge d'encastrement correspondantes.

A la fabrication, les plats sont frappés de deux chiffres : à l'extrémité, le chiffre correspond à l'épaisseur e sans tenir compte des décimales ('3' pour $e=3.5$ mm, '4' pour $e=4.5$ mm...). La lettre x peut être jointe à ce chiffre en cas d'anomalie lors de la fabrication (plat trop court...). Sur la tranche est enfin frappé le numéro correspondant à la barre d'aluminium utilisée dans l'épaisseur adaptée ('1' pour le premier approvisionnement, 2 pour le deuxième...). Chaque barre étant testée et caractérisée en parallèle, cette dernière indication permet de connaître parfaitement le matériau utilisé pour la fabrication du plat considéré.

Sur le site et pour indiquer ce qu'a subi chaque fusible, la date de mise en place et la date de démontage sont indiquées au marqueur (ou le cas échéant, la date de l'avalanche correspondante). De même, pour repérer la position du fusible, est indiqué également son emplacement sur le tripode.

Ces différents emplacements sont codés de la manière suivante : niveau sur le tripode⁴ (I, II, III... en partant du bas, chaque niveau correspond à une tranche de 50 cm) + côté (d=droite ou g=gauche dans le sens de l'écoulement) + position sur le niveau (H=haut, M=milieu, B=bas) + position sur le sous-niveau⁵ (h=haut, m=milieu, b=bas) + éventuellement la lettre⁴ r si le fusible est en retrait. En cas de répétition de lettres⁴, c'est-à-dire si l'emplacement du fusible sur un sous-niveau est le même que sur le niveau (par exemple, s'il est codé B-b, M-m, H-h, pour ses 2 dernières lettres), alors le fusible est codé seulement avec une lettre majuscule (exemple : III-d-H et non III-d-H-h).

Exemple de codage d'un fusible : l'emplacement III-d-M-h-r signifie IIIème emplacement sur le tripode, d : sur le côté droit du tripode, M : position au milieu de la platine, h : en haut sur le sous-niveau du milieu de la platine, r : en retrait.

⁴ Pour la première saison 2002-2003, 4 niveaux distincts étaient disponibles sur la hauteur. Pour l'hiver 2003-2004 ce nombre passe à 7 avec un équipement "continu" de la hauteur du tripode.

⁵ à partir de l'hiver 2003-2004.

Pour chaque saison d'expérimentations, une « carte d'équipement » du tripode est établie avec le positionnement optimal des fusibles.

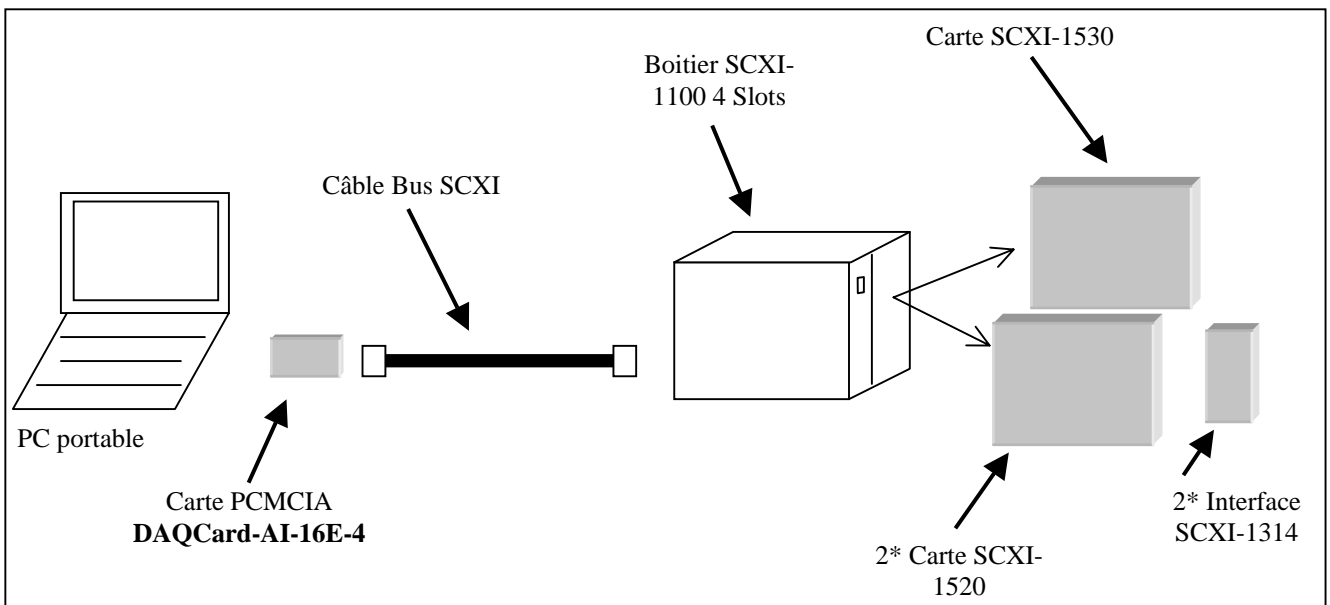
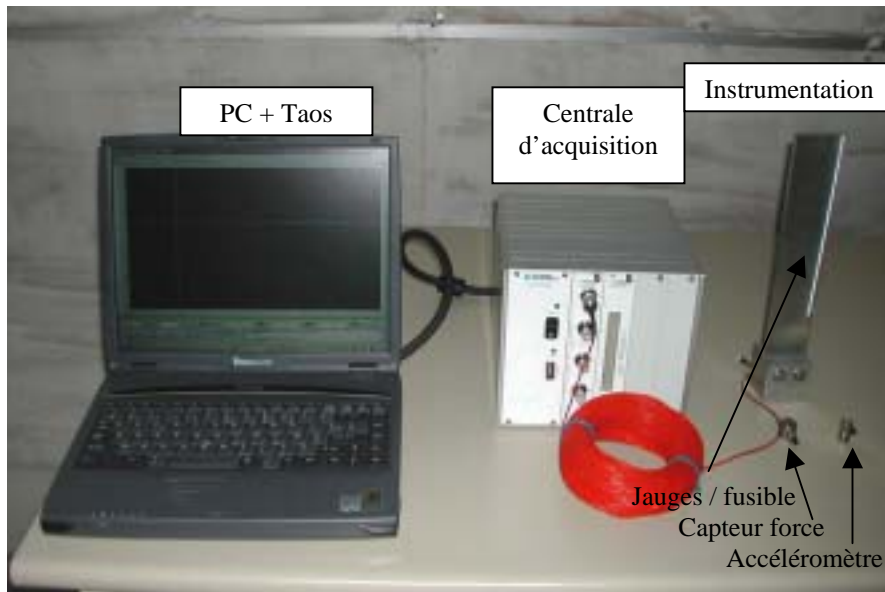
Par ailleurs et comme indiqué précédemment, certains emplacements sont équipés pour accueillir des fusibles instrumentés à l'aide de jauges de contraintes. L'objectif est ici double, à savoir de pouvoir valider parallèlement la mesure de pression maximale évaluée par analyse en retour pour chaque fusible et surtout de pouvoir obtenir une évolution temporelle de la pression jusqu'à sa valeur maximale. A terme, l'intérêt sera ici de pouvoir ensuite exhiber l'évolution du profil vertical de pression au cours du temps et d'évaluer l'effet de phénomènes comme la création d'une zone morte à l'amont de l'obstacle.

Chaque fusible instrumenté l'est à l'aide d'une seule jauge placée de manière optimale sur le plat pour bien caractériser la flexion simple du fusible. Chaque jauge est câblée selon un montage quart de pont. La connectique est réalisée du plat au cube puis par un "domino" sur le cube qui fait la liaison avec le câblage par le chemin de câble vers l'abri.



Jauge sous sa protection et connectique

Une trentaine de mètres de câbles séparent la jauge de la centrale d'acquisition placée dans l'abri. L'acquisition de données est réalisée grâce à une centrale d'acquisition National Instruments gérée par le logiciel Taos (sur base Labview) développé par la société Saphir. Quatre emplacements sont disponibles au niveau de la centrale pour placer les différentes cartes d'acquisition. Pour les fusibles, une carte (SCXI 1520) avec 8 voies d'acquisition est disponible soit autant de fusibles instrumentés. Un autre emplacement est réservé pour les jauges sur la structure plaque du couloir 1. A noter également la présence d'une carte (SCXI 1530) pour accéléromètre et capteur de force qui peuvent être utilisés en parallèle des mesures par jauges de contraintes. Les matériels disponibles ont respectivement pour l'accéléromètre et le capteur de force une sensibilité de 10 mV/g et 1 mV/Newton.



Détail de la chaîne d'acquisition

4.3.3 Caractérisation du matériau aluminium

Pour mener à bien l'analyse en retour des déformations des fusibles, il est nécessaire, avant d'en caractériser et modéliser le comportement, de caractériser précisément le matériau utilisé. En effet, même si l'aluminium 6060T5 a des caractéristiques garanties, des écarts peuvent être observés d'une barre à l'autre. Or, pour une modélisation la plus réaliste possible, il est nécessaire de connaître les caractéristiques réelles (et non réglementaires) du matériau.

Le choix de l'aluminium a été gouverné par plusieurs raisons : d'un point de vue pratique, il s'agit d'un matériau relativement facile à usiner et léger pour le transport à ski sur place.

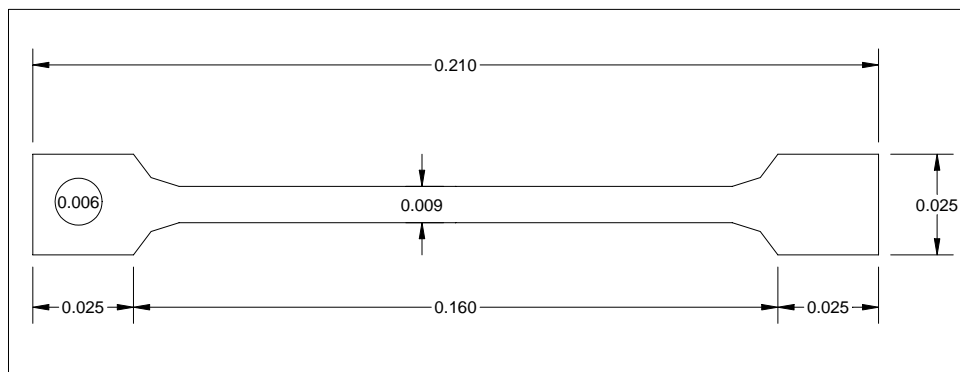
Surtout et vu nos conditions expérimentales, c'est un matériau dont le comportement est bien connu, peu sensible à la température et à la vitesse de déformation dans la gamme de vitesse qui nous intéresse (Langseth et Hopperstad, 1996), (Lindholm et al, 1971), (Abah et al, 1998). Ceci permet donc d'éviter des paramètres additionnels, facilitant la simulation numérique qui peut se contenter de calculs statiques.

L'aluminium utilisé provient de différents lots, eux-mêmes constitués de barres d'épaisseurs différentes. Chacune a donc été testé pour finalement caractériser le matériau des différents fusibles, notamment par l'intermédiaire de leur module d'Young (le coefficient de Poisson a été choisi selon les valeurs classiques de la littérature à 0.3).

Pour déterminer le module d'Young, la loi de comportement du matériau est définie par un essai de traction sur une éprouvette. L'éprouvette est usinée dans une plaque de l'aluminium correspondant, deux jauges et un capteur de déformation sont ensuite placés sur cette dernière pour relever les déformations en fonction de la contrainte. C'est à partir de la courbe contrainte déformation que nous déterminons le module d'Young.

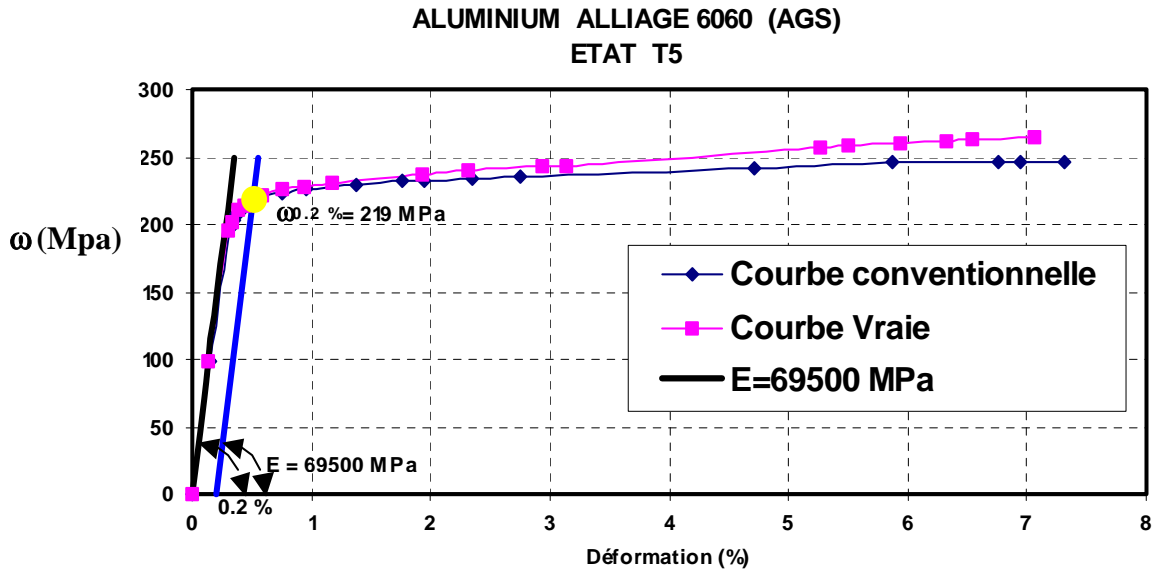


Essai de traction sur une éprouvette en aluminium 6060T5



Dimensions d'une éprouvette en aluminium 6060T5

Un exemple de courbe obtenue est donné ci-dessous :



La courbe conventionnelle est issue directement de l'essai. La courbe vraie est une courbe corrigée:

$$\begin{aligned} \text{déformation (courbe vraie)} &= \ln(1 + \text{déformation (courbe conventionnelle)}) \\ \text{contrainte (courbe vraie)} &= \text{contrainte (courbe conventionnelle)} * \exp(\text{déformation (courbe conventionnelle)}) \end{aligned}$$

Les calculs de modélisation utilisent ensuite la courbe vraie.

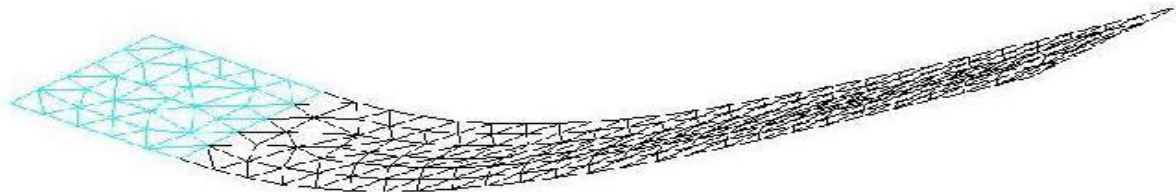
Au final, on constate des écarts relativement importants entre les comportements des différentes barres d'aluminium utilisées. Par exemple, les valeurs du module d'Young varient de 64.8 Gpa à 70.7 Gpa. De même, pour les caractéristiques du palier plastique qui est pourtant prépondérant pour l'analyse en retour des déformations puisque les fusibles exploités sont finalement les fusibles déformés.

De manière stricte, il faut donc analyser chaque fusible selon les caractéristiques de l'aluminium à partir duquel il a été fabriqué. A terme, il sera cependant intéressant de pouvoir aussi disposer d'un matériau "type" avec des caractéristiques moyennes uniques permettant de simplifier et d'accélérer le processus d'analyse inverse (notamment avec la possibilité de générer des abaques ne dépendant que de l'épaisseur du fusible). Bien entendu et dans ce cas, les calculs d'erreurs correspondant devront être menés en parallèle pour déterminer la précision de la démarche. Dans notre contexte, une précision de quelques pourcents est de toute façon largement acceptable.

4.3.4 Modélisation du comportement des fusibles

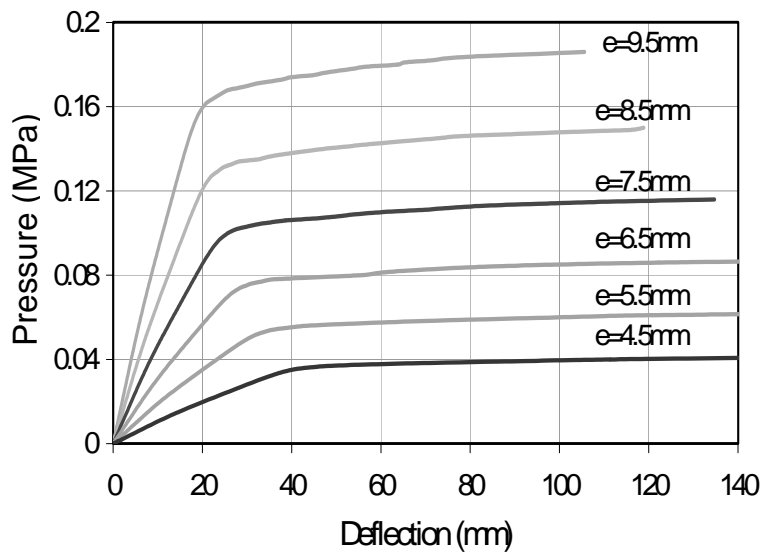
Des simulations menées par l'URGC-INSA en non linéaire géométrique à partir du code éléments finis CASTEM ont permis ensuite de déterminer les capacités résistantes correspondant à chaque épaisseur de fusibles.

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. Le maillage a également été raffiné près de la condition de bord encastree, zone de développement d'une possible charnière plastique. Une analyse non linéaire combinant de grands déplacements, grandes rotations, et la plasticité a été effectuée en intégrant bien sûr le comportement du matériau évalué précédemment.



Exemple de maillage et de déformée

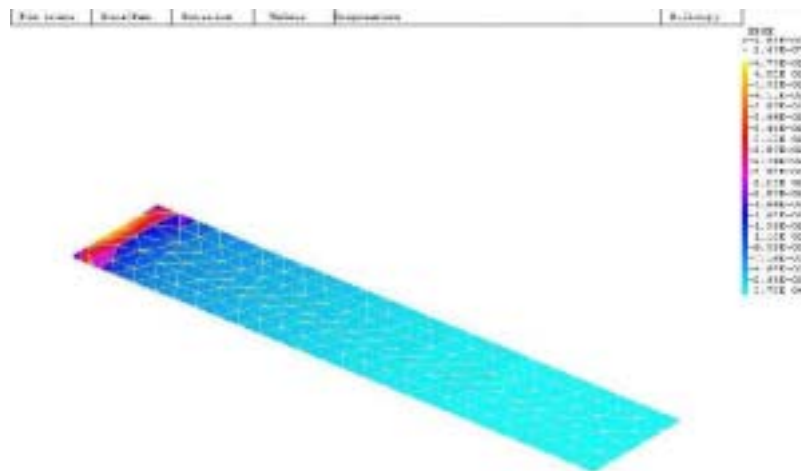
Pour la simulation, la charge appliquée à la structure correspond à une pression uniforme graduellement incrémentée. Aucune interaction n'a été considérée entre la structure et la charge, la pression a été assumée conservatrice (avec une direction constante). Au final et pour un des types d'aluminium utilisé (Cf. discussion précédente), on obtient les courbes charge-déflexion suivantes :



Ceci correspond finalement aux valeurs suivantes de pression maximale (supposée répartie uniformément) pour une plastification marquée du fusible :

Epaisseur fusible (mm)	Pression maximale (MPa)
4.5	0.041
5.5	0.062
6.5	0.088
7.5	0.116
8.5	0.150
9.5	0.186

Ces simulations ont également permis d'étudier la position la plus pertinente pour le placement de la jauge de contrainte sur les fusibles instrumentés. Celle-ci est finalement placée à 1.5 cm de la limite de l'encastrement.



Exemple du champ de déformation axiale en situation ultime

4.3.5 Validation

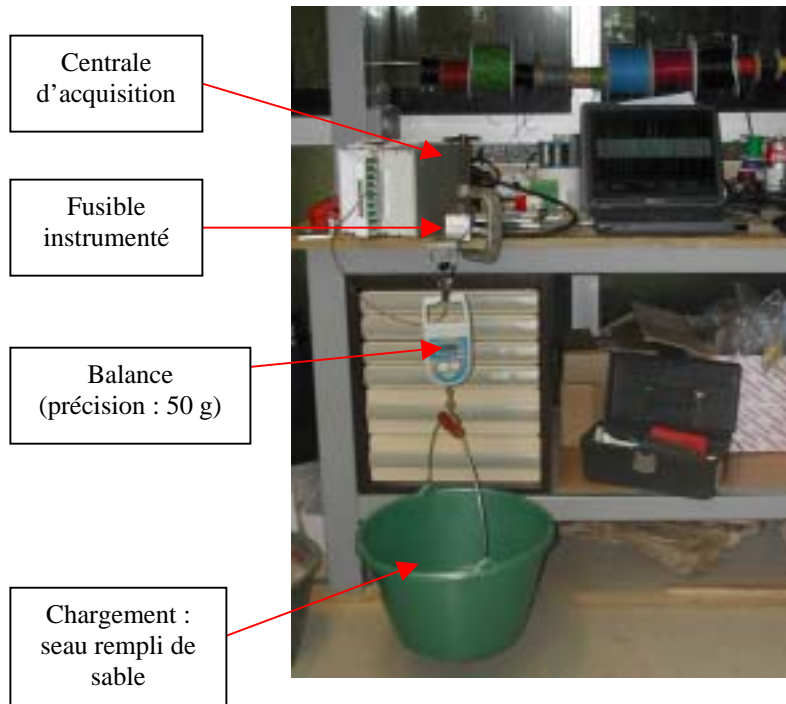
Deux types de validation ont été menées pour évaluer les principes de mesure retenus. La première permet de vérifier l'adéquation entre les résultats attendus par la RDM classique et ceux donnés par notre chaîne d'acquisition, à la fois pour valider le comportement des fusibles dans la zone élastique et pour confirmer la bonne marche du matériel d'acquisition. La seconde est un essai en laboratoire jusqu'à l'état ultime de déformation d'un fusible, pour valider les simulations complètes en plasticité ainsi que la pertinence des mesures par jauges de contraintes.

4.3.5.1 Validation du comportement élastique des fusibles et des moyens d'acquisition

Plusieurs points ont été plus particulièrement étudiés dans cette partie:

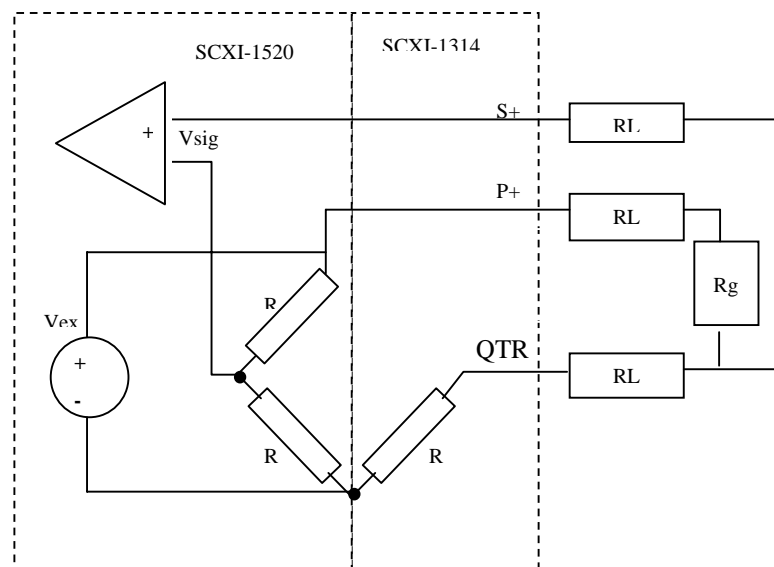
- la reproductibilité des résultats. Pour cela, un même fusible a été testé plusieurs fois.
- la non dispersion des mesures. Pour ce faire, deux fusibles différents mais de même épaisseur ont été testés.
- l'influence de la longueur des câbles sur les mesures.

Lors de cette expérimentation et faute de pouvoir effectivement appliquer une pression, une masse connue est placée à l'extrémité du fusible, à une distance connue de l'encastrement. Ce fusible est instrumenté avec une jauge de contrainte reliée à la centrale d'acquisition dans la même configuration que celle utilisée sur le site du Lautaret. Toutes les jauges sont testées en compression. En effet, l'avalanche arrive sur le côté du plat du fusible non instrumenté. Le logiciel Taos permet ensuite d'exploiter la déformation du fusible au niveau de la jauge, sous forme d'une tension.



Pour pouvoir comparer les résultats expérimentaux à la théorie, les calculs nécessaires ont été menés pour relier théoriquement la tension donnée par le système d'acquisition à la charge appliquée au fusible. Le modèle RDM correspondant est celui d'une poutre console parfaitement encastré avec l'hypothèse d'un comportement élastique du matériau.

Les jauges sont montées selon le schéma « quart de pont » suivant :



ŝ Tension mesurée sous TAOS : V_{sig}

ŝ Tension d'excitation : $V_{ex}=2,5V$

A noter ici que nous travaillons de manière relative :

$$V_r = (V_{sig \text{ Constraint}} - V_{sig \text{ non Constraint}}) / V_{ex},$$

ce qui permettra notamment de s'affranchir des problèmes de recalage (par exemple, dus à la température).

Š Facteur de jauge : $GF = 2,065$

Š $R_3 = R_g = 120$

Š Résistance du câble : $R_L (= 9.6 \text{ pour environ } 30 \text{ mètres})$

Š Déformation $= (-4V_r) / (GF(1+4V_r)) * (1+R_L/R_g)$

Soit :

$$V_r = 4 \frac{GF \cdot \kappa}{12 \frac{R_L}{R_g}} \cdot \frac{1}{4 \frac{GF \cdot \kappa}{R_g} + 2 \frac{R_L}{R_g}}$$

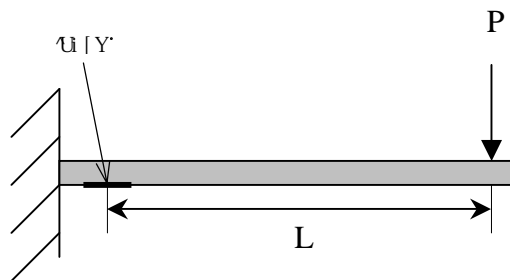
Avec

Š $\kappa = \frac{\omega}{E}$

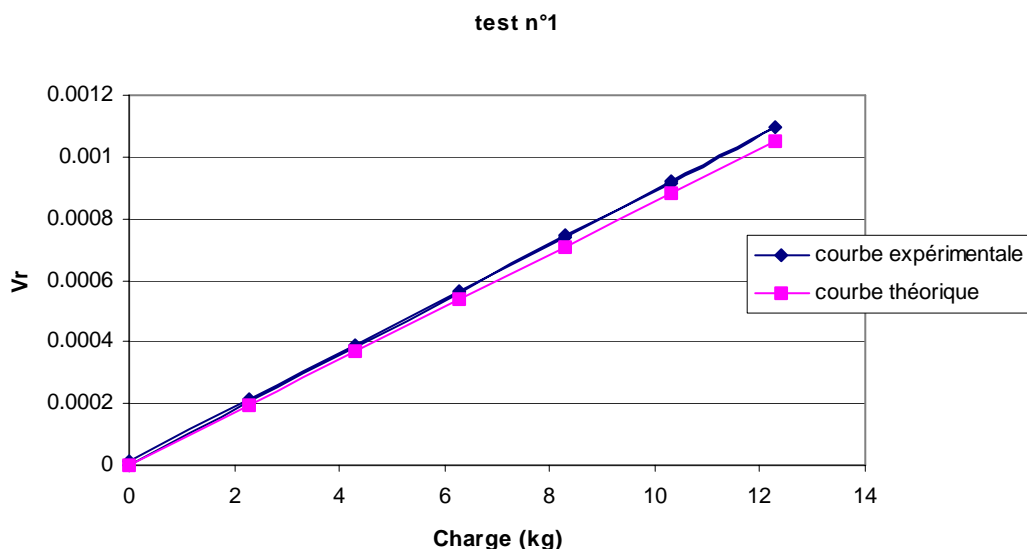
Š $\omega = \frac{M \cdot y}{I}$

Š $I = (bh^3)/12$, avec b, largeur du fusible = 5 cm et h, épaisseur du fusible.

Š $M = P \cdot L$, M étant le moment supplémentaire créé par la charge P appliquée et L la distance entre la jauge de contrainte et le point d'application de la force P (cf. schéma ci-dessous) soit $L = 20 \text{ cm}$.



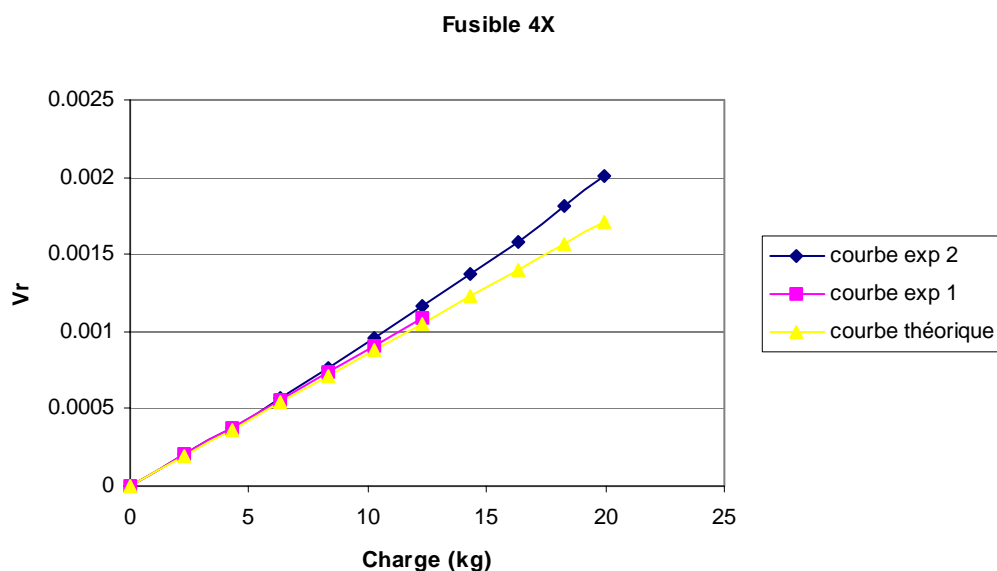
Les deux premières séries de mesures nous permettent de tester la reproductibilité des résultats. Pour cela, un même fusible d'épaisseur 4.5 mm a subi un cycle de charge décharge (test n°1) :



Pour un cycle de charge-décharge d'un fusible, la tension est donc bien identique pour un même chargement, ce qui confirme l'élasticité du matériau pour les sollicitations limitées. Par ailleurs, la courbe obtenue se rapproche assez bien de la théorie, les valeurs théoriques étant légèrement plus faibles. Cette différence peut être due à la valeur des paramètres utilisés pour nos calculs théoriques, notamment celle du module d'Young avec les variations possibles vues auparavant. L'écart reste limité, de l'ordre de 4%.

Lors d'un deuxième test (test n°2), ce même fusible a de nouveau été chargé :

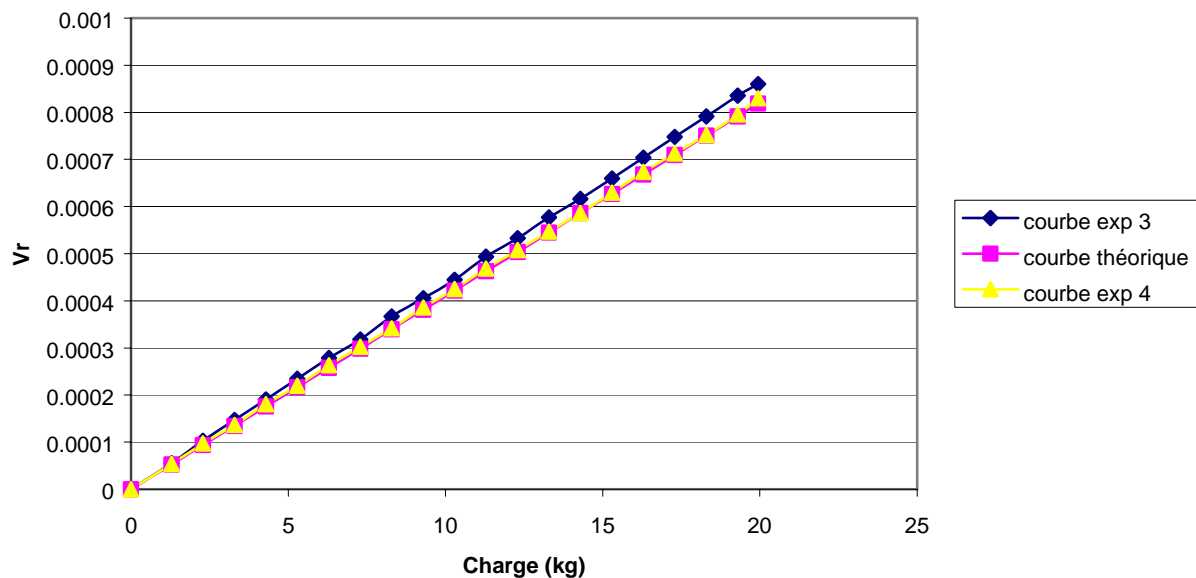
Les deux courbes $V_r=f(P)$ obtenues ainsi que la courbe théorique peuvent donc être comparées :



La reproductibilité des essais semble donc bien assurée avec la proximité des deux courbes expérimentales. Néanmoins, pour un chargement plus élevé ($P > 12$ kg), la courbe

expérimentale semble s'écarter de la courbe théorique ce qui tend à prouver que l'on sort déjà du domaine purement élastique avec les premières non linéarités.

Un troisième test a ensuite consisté à charger de la même façon deux fusibles distincts (respectivement courbes 3 et 4) mais de mêmes caractéristiques (épaisseur de 6.5 mm) pour tester la reproductibilité des résultats d'un fusible à l'autre. Ces deux fusibles sont issus du même lot d'aluminium.



Ces 3 courbes restent là aussi très proches, la pente de la courbe du test n°3 étant légèrement supérieure aux deux autres (écart d'environ 4.7 % sur la pente). Il n'y a donc pas a priori de dispersion significative et l'ensemble du processus de fabrication peut être considéré comme suffisamment fiable avec le bon niveau de précision.

Enfin, pour tester l'influence de la longueur de câble, nous avons câblé un fusible avec une longueur de 70 m, correspondant aux longueurs maximales utilisées sur le site. Nous pouvons ainsi comparer les résultats obtenus avec un fusible câblé "court" (qq. cm) et un fusible câblé avec 70 mètres (RL=12.6 T). L'écart sur la pente avec la théorie passe dans ce dernier cas à environ 8% ce qui reste tout à fait raisonnable.

Cette première validation a notamment permis d'assimiler l'exploitation des signaux issus des jauges et de valider la reproductibilité et la non dispersion des résultats obtenus.

4.3.5.2 Validation de la modélisation numérique en laboratoire

Il s'agit ici de tester un fusible instrumenté, encastré d'un côté et libre de l'autre, soumis à une force ponctuelle appliquée à une certaine distance de l'encastrement. L'objectif est ici de comparer le résultat obtenu avec celui provenant de la simulation numérique du même essai sur le logiciel CASTEM pour valider la modélisation utilisée.

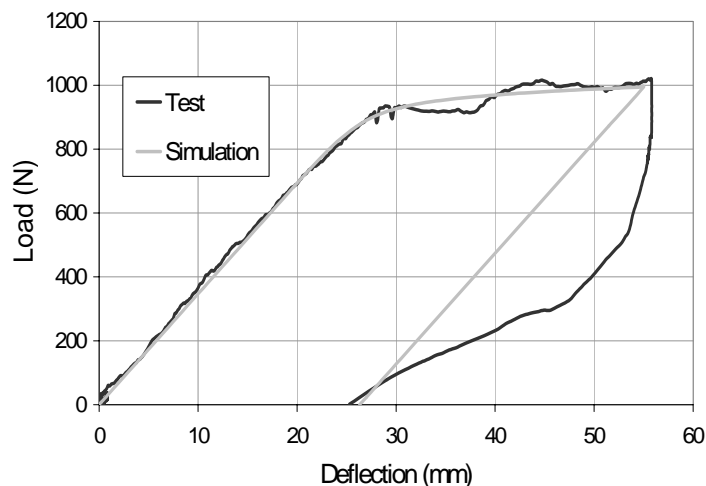


Essai de flexion au laboratoire de l'INSA

Cet essai s'est déroulé au laboratoire de l'INSA de Lyon. L'épaisseur du fusible testé est de 8.5mm. Les conditions aux limites sont 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 230mm de l'encastrement. La direction d'application de la charge reste verticale pendant l'essai. Le fusible, équipé de deux jauges de déformation a donc été testé en flexion simple. Les deux jauges ont été placées sur chacune des faces à une distance de 15mm par rapport au bord du bloc en aluminium⁶.

La sollicitation appliquée diffère effectivement de l'action de la neige sur le fusible mais le but de cette expérimentation est surtout de valider la modélisation du comportement mécanique du fusible. Cette validation dépasse le stade purement élastique précédent pour bien tester le traitement des non linéarités du problème.

Nous pouvons ainsi comparer les courbes de comportement obtenues lors de l'essai de laboratoire avec celle obtenues par la simulation avec CASTEM :



⁶ Placement identique à celui de la jauge placée sur les "vrais" fusibles avec une jauge supplémentaire sur l'autre face pour assurer la mesure.

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.

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 finalement le paramètre important de la méthode proposée.

4.3.6 Exploitation des déformations des fusibles

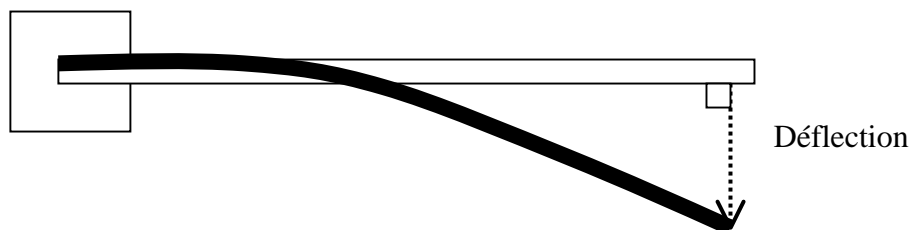
Contrairement à une intuition initiale, l'évaluation du profil de pression maximale ne peut se contenter d'une lecture binaire (tel fusible déformé, tel fusible intact...) sur l'échantillonnage des fusibles d'un niveau pour en exhiber une valeur de pression moyenne. Il est nécessaire d'examiner chaque fusible, car d'une part la pression peut varier rapidement dans l'épaisseur de l'écoulement et d'autre part l'analyse en retour de chaque pièce peut apporter une précision bien supérieure.

Dans ces conditions, les fusibles correctement exploitables sont ceux qui ont subi une déformation "raisonnable". En effet, un fusible non déformé (et sauf s'il est instrumenté) ne pourra donner qu'une borne supérieure de la pression en fonction de sa résistance élastique limite. De même, un fusible complètement déformé ne peut représenter la pression effectivement appliquée mais seulement une borne inférieure de cette pression en fonction de sa résistance "maximale".

A noter ici que la pression sur le plat du fusible est toujours supposée uniforme, hypothèse largement acceptable à l'échelle de ces micro-structures capteurs.

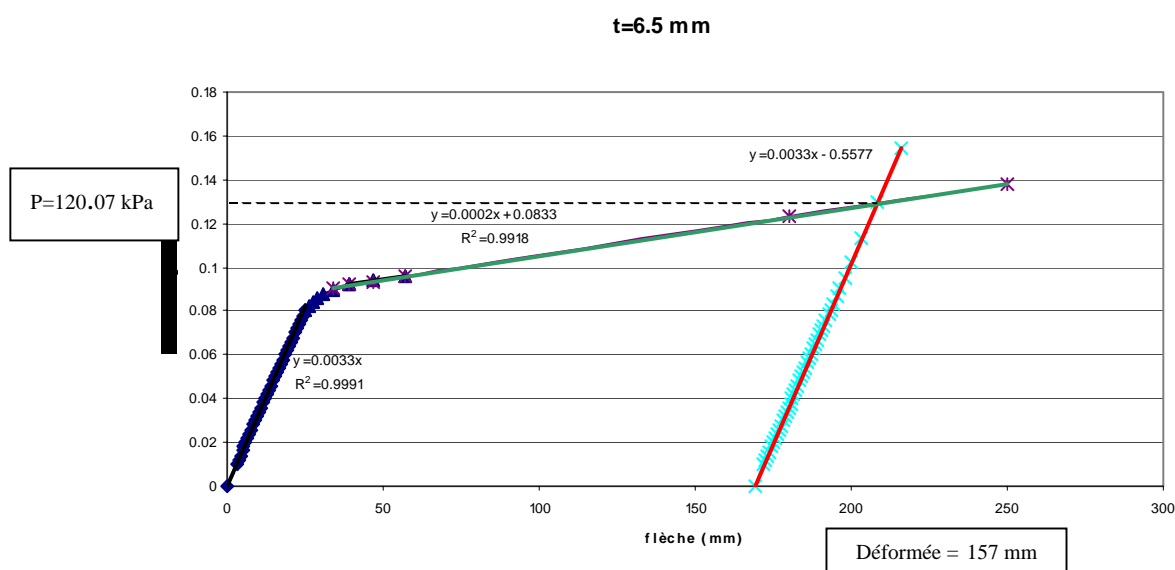
Finalement, pour mener l'analyse en retour d'un fusible "raisonnablement" déformé pour remonter à la pression appliquée par l'avalanche, le paramètre intéressant est sa déflexion observée qui correspond à la déflexion résiduelle évoquée précédemment. En effet, le retour élastique a bien eu lieu et se produit juste à la fin de l'action de l'écoulement sur le fusible.

Dans notre cas et pour ensuite pouvoir utiliser les courbes charge-déflexion issues des simulations numériques, la déflexion résiduelle du fusible correspond au déplacement de l'extrémité libre du fusible mesurée perpendiculairement à son plan initial.



Ainsi, à partir de la courbe charge-déflexion correspondant au matériau et à l'épaisseur du fusible considéré, la pression maximale qui a provoqué la déformation mesurée est déterminée en traçant une ligne parallèle à la partie élastique de la courbe et dont l'abscisse à l'origine vaut la valeur de la déflexion. Cette ligne parallèle représente le retour élastique du fusible après la fin de l'action de l'avalanche. L'intersection de cette droite avec la courbe charge-déflexion permet ainsi de déterminer la pression maximale subie par le fusible lors de l'avalanche.

Exemple pour un fusible d'épaisseur 6.5 mm avec une déformée de 157 mm :

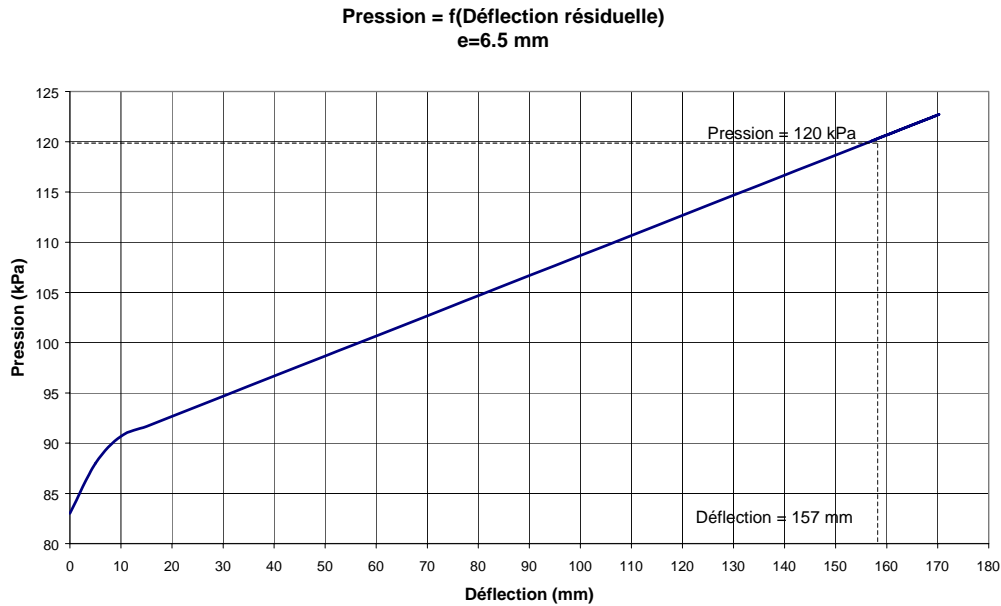


La pression maximale qu'a subie le fusible correspond à l'intersection de la droite parallèle à la branche élastique (droite rouge) avec la courbe charge-déflexion (courbe verte), soit une pression de 120.07 kPa.

Pour éviter cette manipulation graphique, des abaques donnant directement la relation

$$pression=f(déflexion\ résiduelle)$$

peuvent également être construit. L'exemple ci-dessous illustre la lecture directe du cas précédent sur l'abaque correspondant à $e=6.5$ mm.



Or, en plus d’avoir un abaque par épaisseur de fusible, il faut également considérer le matériau correspondant pour une précision optimale ce qui multiplie les combinaisons. Ainsi cette solution des abaques s’applique surtout au cas où on accepte une précision moindre avec un matériau type unique (ou alors des fusibles dans des matériaux avec des caractéristiques très proches). Bien entendu, la précision de cette lecture directe doit alors être évaluée.

4.3.7 Conclusion

Comme le montrent les parties précédentes, l’ensemble du processus d’évaluation de la pression par analyse en retour du comportement de fusibles en aluminium a pu être validé. Au final, la méthode apparaît comme relativement robuste, peu coûteuse et simple à mettre en œuvre. Surtout, l’analyse en retour garantit que le résultat est bien la pression effectivement subie par la structure. En multipliant le nombre de fusibles et en exploitant également les données temporelles des jauges, il est donc possible d’obtenir le profil de pression maximale généré par un écoulement d’avalanche et d’avoir des éléments quant à son évolution dans le temps.

La seule limite de cette expérimentation concerne finalement la question des effets d’échelle et de la représentativité des fusibles comme “vrais” obstacle. En première approche, il peut être considéré que l’obstacle n’est pas le fusible lui-même mais le tripode hérissé de ses fusibles. A ce titre, l’influence de l’écartement des fusibles entre eux est également intéressant à étudier. Simplement et pour apporter une meilleure réponse sur ce point, la seconde expérimentation prévue sur le site du Lautaret concerne la mise en place d’une structure “plaque” à une échelle plus importante pour bien représenter le cas d’un obstacle réel dans l’écoulement.

4.4 (Macro)-Structure "plaque"

4.4.1 Objectif

Comme indiqué précédemment, l'utilisation des fusibles pose la question de leur échelle et de leur représentativité dans l'avalanche. L'idée est donc ici d'utiliser une structure plus réaliste à savoir une plaque de 1m² placée dans l'écoulement et qui sera ainsi en situation "réelle" pour retranscrire au mieux tous les phénomènes d'interaction et d'influence mutuelle avec l'avalanche. Cette plaque peut-être vue comme un mur placé frontalement à l'avalanche, cas relativement fréquent dans notre contexte des risques en montagne.

Par ailleurs et si les fusibles sont surtout destinés à résoudre le problème de la répartition spatiale de la pression générée par une avalanche, cette plaque a surtout pour objectif de répondre à la question de l'évolution temporelle de la pression, moyennée sur la surface de l'obstacle. A terme, il s'agira de combiner les résultats obtenus par ces deux expérimentations différentes pour obtenir les profils spatio-temporels de l'action d'une avalanche sur une structure.

De même, le principe de mesure est toujours l'analyse en retour du comportement de la plaque. Cependant et pour des raisons techniques et financières évidentes, celle-ci est dimensionnée pour rester dans le domaine élastique pour ne pas subir de déformations irréversibles et permettre des mesures sur plusieurs avalanches.

4.4.2 Description de la structure plaque

La structure plaque décrite ici a été prévue pour venir prendre place dans le couloir n°1 du site expérimental du Lautaret. Pour cela, elle nécessite la création d'un nouveau massif d'ancrage en béton armé, lui-même relié par chemin de câble à l'abri pour l'instrumentation. Ce massif a été dessiné de manière à offrir toute la polyvalence nécessaire pour de futures expérimentations ce qui explique notamment la création d'un mur de 4 mètres de haut, éventuel support de nouveaux capteurs ou appui en tête de grandes structures et la possibilité d'ancrer la structure verticalement ou perpendiculairement au sol.

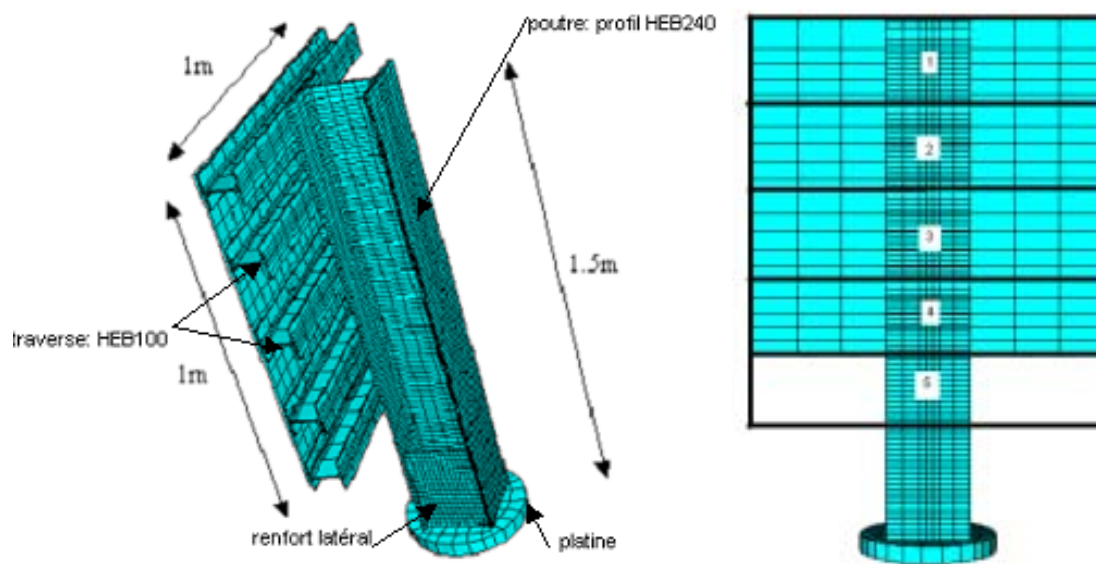


Massif d'ancrage et chemin de câble ne fond de caniveau vers l'abri.

Pour pouvoir mesurer le plus simplement possible les effets de l'avalanche par analyse en retour, l'ensemble de la structure, en acier, repose sur une poutre unique HEB240. Cette poutre est renforcée en pied sur 30 cm de haut et soudée à une platine circulaire (épaisseur 5cm, diamètre 40cm) percée pour le boulonnage à la cage d'ancrage (constituée de 12 barres A27) noyée dans le massif support (principe identique aux ancrages des pylônes des remontées mécaniques). Cette ancrage doit permettre de considérer un encastrement parfait en pied de la structure.



Sur cette poutre principale sont ensuite boulonnées jusqu'à 5 poutrelles horizontales HEB100 de 1m de longueur et qui supportent elles-mêmes 4 sous-plaques de 1 cm d'épaisseur et de 25*100cm. Le principe retenu permet de disposer d'une structure modulaire, à la fois sur la hauteur en fonction de l'épaisseur du manteau en place et pour la surface de plaque. A noter que la surface amont est peinte de manière quadrillée pour faciliter l'exploitation des prises de vue rapprochées de la structure et de ses interactions avec l'écoulement.



Vues de la structure et modulations possibles des positions des sous-plaques

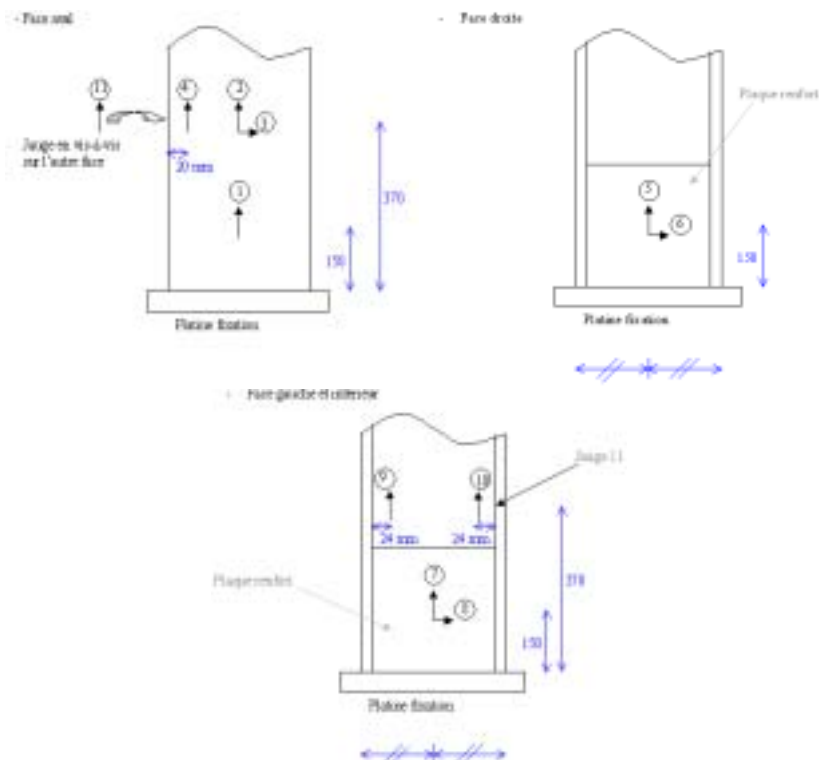
De manière équivalente aux fusibles, l'exploitation des résultats se fait par analyse en retour du comportement de la structure grâce aux jauges placées en pied de la poutre principale. Ces

jauges ont été placées de manière optimale pour décrire au mieux le comportement de l'ensemble par flexion ou torsion et permettre ensuite de remonter à la sollicitation et à son évolution dans le temps selon certaines hypothèses. A ce sujet, il faut d'ailleurs déjà noter que la pression ne pourra être que moyennée sur la surface de la plaque et que celle-ci ne joue en quelque sorte qu'un rôle de macro-récepteur rigide pour le macro-capteur que constitue la poutre principale en console. Rappelons également que tout doit se passer ici dans le domaine élastique.



Les différentes jauges sur le pied de la poutre principale

Au final, le pied de la poutre est instrumenté par 11 jauges mises en place par l'URGC-INSA. Elles sont disposées de façon à mesurer les déformations verticales et horizontales à une hauteur de 15 et 37 cm. Le nombre de voies d'acquisition disponibles étant a priori de 8, seules les jauges les plus représentatives seront utilisées.



Disposition et numérotation des jauges

Enfin et en plus de ces jauges, un accéléromètre est placé selon l'axe de flexion principale en tête de la poutre HEB240 alors qu'un capteur de force est positionné proche du centre de la plaque, face à l'écoulement. L'objectif de ces mesures annexes est d'apporter des renseignements complémentaires permettant d'une part de valider les résultats obtenus et d'autre part de les comparer avec d'autres méthodes de mesure.

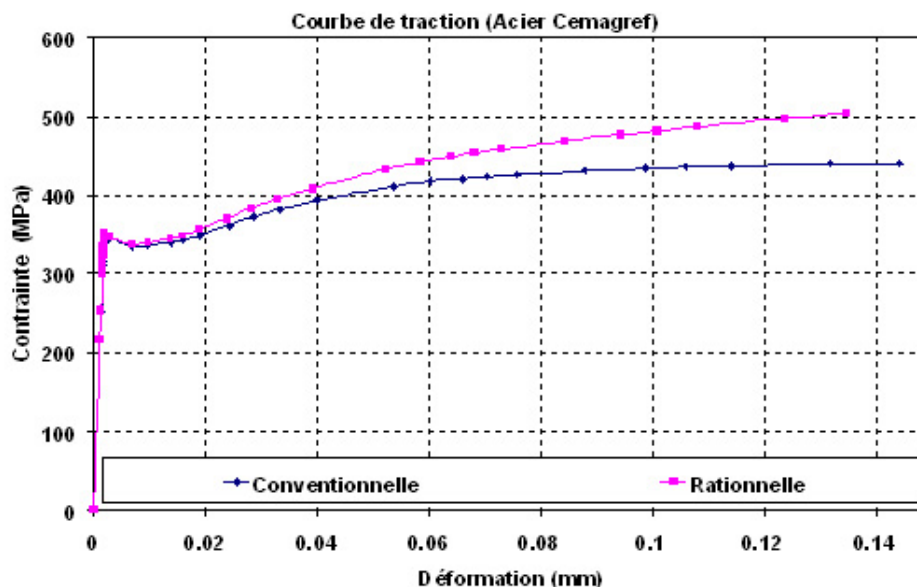
4.4.3 Etude numérique de la structure

4.4.3.1 Résultats préliminaires

Quelques calculs préliminaires à l'aide du logiciel Plaxis ont permis de valider l'hypothèse de l'encastrement en pied de poutre, hypothèse reprise ensuite dans les modélisations de la structure. De même, la comparaison des rigidités respectives de la poutre principale et de l'ensemble "poutrelles + sous-plaques" a permis de vérifier le rôle de récepteur "rigide" de ce dernier avec une rigidité 15 fois supérieure à celle de la poutre. Cette vérification permet notamment de privilégier la modélisation de la poutre principale en simplifiant la prise en compte des poutrelles et des sous-plaques. Enfin, il a été convenu de travailler uniquement avec la composante normale à la plaque de la sollicitation (en négligeant les effets tangentiels, cela revient à intégrer directement les carrés des cosinus liés aux angles d'incidence).

4.4.3.2 Caractérisation de l'acier

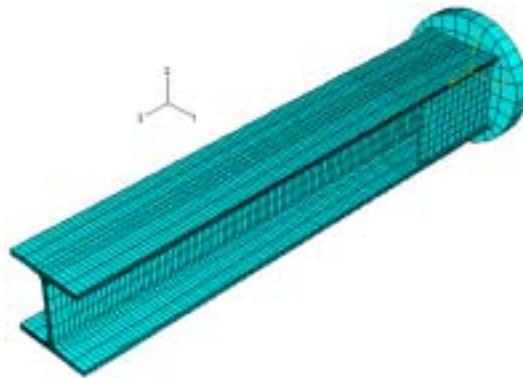
De la même façon que pour l'aluminium des fusibles, un échantillon de l'acier utilisé a été testé dans le laboratoire de l'URGC-INSA pour obtenir la courbe "contraintes-déformations" typique ci-dessous à partir d'un essai de traction :



Le comportement correspondant du matériau a ainsi pu être intégré au mieux dans les calculs en le ramenant à un modèle élasto-plastique avec écrouissage. Les simplifications nécessaires pour utiliser cette modélisation restent minimales et ont été choisies pour aller dans le sens de la sécurité.

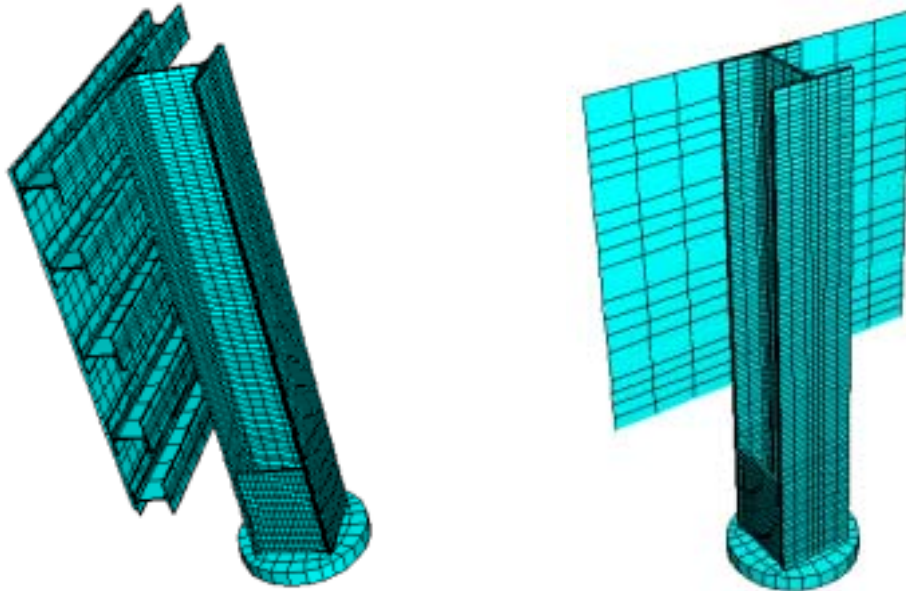
4.4.3.3 Modélisation de la structure

La modélisation est menée grâce au logiciel “éléments finis” Abaqus (version 6.3). L’algorithme d’intégration du temps utilisé est soit implicite pour les calculs et vérifications (pseudo)-statiques soit explicite pour les calculs dynamiques. Plusieurs maillages ont été construits, du modèle complet 3D de l’ensemble à des modèles plus ou moins simplifiés (poutrelles en éléments poutres et sous-plaques en éléments coques) permettant de limiter les temps de calculs. A noter que les renforts au pied de la poutre principale ont toujours été pris en compte pour le rôle particulier qu’ils peuvent jouer dans cette zone prépondérante qu’est l’encastrement. Un maillage optimal de cette poutre principale a finalement pu être réalisé avec 6300 éléments 3D C3D8R.



Modélisation de la poutre principale, avec sa platine d'ancrage et ses renforts

Enfin, les soudures ont été considérées comme des liaisons collées parfaites alors que les assemblages par boulonnage sont réalisés artificiellement grâce à un nœud de maillage commun aux deux parties à assembler.



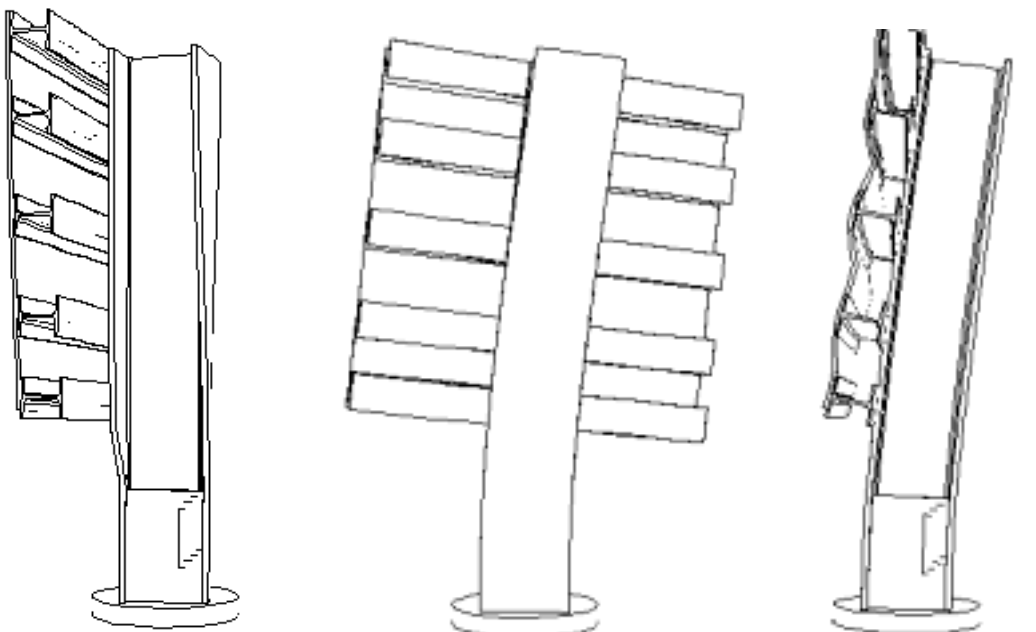
Modèle complet 3D et modèle simplifiée (poutrelles en 1D et sous-plaques en 2D)

4.4.3.4 Etude modale

A partir des deux modèles ci-dessus, une première vérification a consisté à mener l'étude modale de la structure. Pour cela, les fréquences des trois premiers modes propres sont comparées :

- Le premier mode propre est la rotation de la plaque, qui entraîne la torsion de la poutre HEB 240.
- Le deuxième mode est la flexion de la poutre dans le sens de l'inertie la plus faible s'accompagnant également d'une rotation de la plaque.
- Le troisième mode est la flexion "amont-aval" de la poutre dans le sens de l'inertie la plus forte.

A noter que la flexion "amont-aval" est le comportement normal recherché sous l'action de l'avalanche.



Modes propres 1, 2 et 3

Ces trois modes sont les plus représentatifs du comportement possible de la plaque et même s'il existe d'autres modes, les fréquences correspondantes sont de toute façon trop élevées par rapport à celles liées à l'avalanche.

Le tableau ci-dessous récapitule les fréquences obtenues, en fonction du modèle utilisé :

Modes	Plaque 2D, Hz	Plaque 3D, Hz
1	27,6	31,9
2	45,2	53,4
3	68,6	72,2

Même si on observe une légère dépendance au maillage, les valeurs sont proches entre les deux modèles. Par ailleurs, les fréquences obtenues peuvent être considérées a priori comme

supérieures à celles liées à la sollicitation d'une avalanche (obtenues à partir de quelques enregistrements de la littérature, dans d'autres conditions expérimentales...). Cependant, les phénomènes vibratoires de résonance devront être recherchés attentivement pour s'assurer qu'ils ne viennent pas masquer l'action réelle de l'avalanche.

A noter enfin que l'utilisation du modèle simplifié donnant ici de bons résultats par rapport à la "référence" 3D, ce modèle a été utilisé pour la suite.

4.4.3.5 Capacité résistante de la structure

Une des spécifications forte de cette expérimentation est le maintien dans la zone élastique de la structure pour permettre sa réutilisation pour plusieurs avalanches. Or, avant sa fabrication, la structure plaque a été dimensionnée par de simples calculs de RDM à partir de caractéristiques types du matériau et d'un modèle de poutre en console. La connaissance du matériau et la possibilité de prendre correctement en compte la géométrie complète (y compris les renforts) de la structure permet de calculer la capacité effective de celle-ci pour connaître ses limites de résistance dans différentes configurations.



Positions possibles des 4 sous-plaques

Comme indiqué précédemment, la plaque est modulable avec les combinaisons possibles de ses 4 sous-plaques. Les principales configurations (A à G) envisagées sont les suivantes :

Position des plaques	A	B	C	D	E	F	G
1	*	*	*				
2	*	*	*	*			*
3	*	*		*	*	*	*
4	*			*	*	*	
5				*	*		

Un premier calcul, statique, consiste à déterminer la pression qui appliquée sur la surface des sous-plaques conduit à l'apparition des premières plastifications dans la structure. Par convention, cette pression représente la capacité résistante de la structure, juste avant sa

‘rupture’ par déformations plastiques irréversibles. Les capacités résistantes des différentes configurations sont les suivantes :

Configuration	A	B	C	D	E	F	G
Limite élastique(kPa)	400	500	650	600	900	1200	800

Quelle que soit la configuration, la capacité résistante statique est donc bien supérieure aux pressions attendues sur le site expérimental du Lautaret ce qui assure un comportement élastique de la structure et confirme son dimensionnement initial. La configuration ‘type’ pendant les expérimentations est la configuration A.

Quelques premiers calculs ont également permis de montrer une faible dépendance au caractère dynamique. Ce point reste cependant à être vérifié avec les premiers résultats expérimentaux pour évaluer l’importance de la vitesse de déformation ou des effets inertiels.

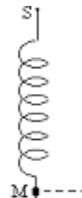
4.4.4 Analyse en retour – exploitation des résultats

Le paragraphe précédent montre la capacité des outils de calculs à modéliser le comportement de cette structure plaque sous sollicitation. Or, notre principe expérimental nécessite plutôt de savoir remonter à la sollicitation initiale pour obtenir les profils temporels plus particulièrement recherchés ici.

Bien sûr, une première méthode par ‘tâtonnements’ permettrait de tester différentes sollicitations jusqu’à retrouver les bonnes valeurs de déformation au niveau des jauges. Cette approche, trop hasardeuse, n’est pas satisfaisante d’autant plus qu’un certain volume de données sera à traiter. Une méthode plus systématique est donc indispensable.

En contrepartie, un certain nombre d’hypothèses supplémentaires sont nécessaires qui s’ajoutent à celle de pression moyennée sur la surface du ‘récepteur – sous-plaques’, inhérente à l’utilisation de cette structure. En effet, l’analyse en retour oblige à perdre une partie de l’information. Nous verrons cependant qu’elle permet de garder l’essentiel.

La première méthode développée ici, relativement simple mais justifiée par l’étude vibratoire précédente, est basée sur la modélisation de la structure par un oscillateur à un degré de liberté en privilégiant la flexion ‘amont-aval’ de la structure. La configuration retenue pour les sous-plaques est la configuration A.



La rigidité du ressort est obtenue grâce à un calcul sous Abaqus en effectuant le rapport entre la pression résultante et le déplacement au centre de gravité de la plaque en flexion ‘amont-aval’:

$$K_{eq} = F/u = 60.8 \text{ MN/m}$$

La masse équivalente est obtenue grâce à la fréquence d'amplification de la flexion "amont-aval" donnée par Abaqus :

$$w = 2\phi * 68.6 = 431 \text{ rad/s}$$

$$w_n = \sqrt{\frac{K_{eq}}{M_{eq}}}$$

$$M_{eq} = 327.3 \text{ kg}$$

Une hypothèse supplémentaire est la non prise en compte de l'amortissement qui, vu la durée de la sollicitation, peut-être négligé dans un premier temps.

La mise en équation de l'oscillateur à un degré de liberté est la suivante :

$$m_{ek} \ddot{x} + k_{eq} x = P \sin wt$$

- x est le déplacement de la structure
- P est la pression appliquée sur la structure
- w est la pulsation de la sollicitation

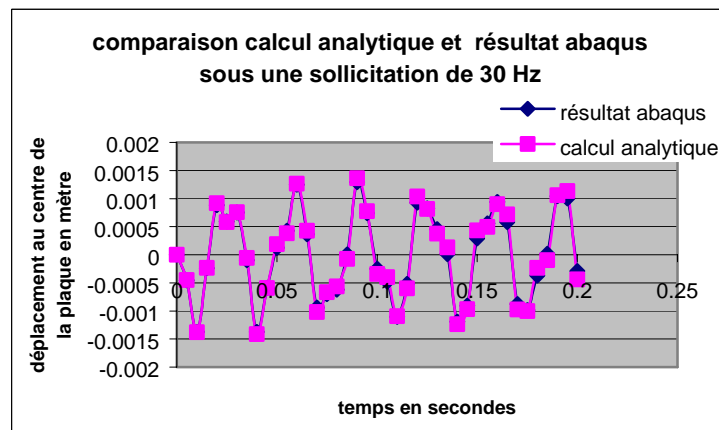
La solution générale de cette équation différentielle est :

$$x(t) = C \cos wt + B \sin wt + \frac{P}{k_{ek}} \frac{1}{\frac{w^2}{w_n^2} - 1} \sin wt$$

Soit avec les conditions initiales (déplacement et vitesse nuls à t=0) :

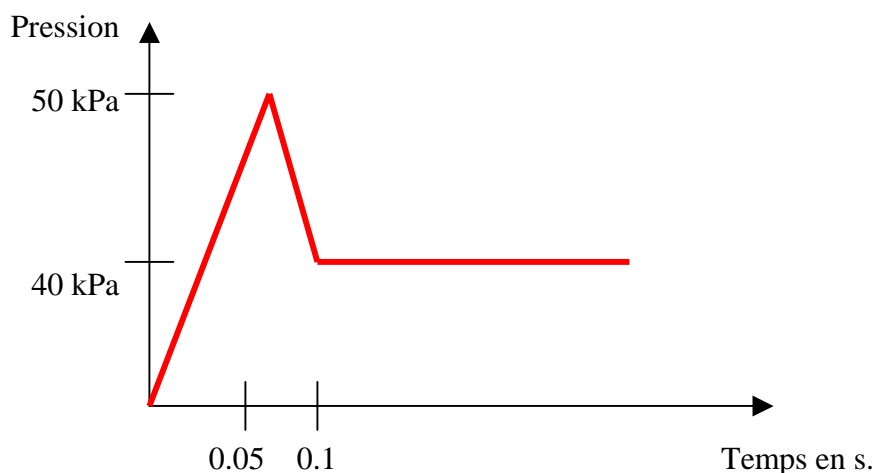
$$x(t) = \frac{P}{k_{ek}} \frac{1}{\frac{w^2}{w_n^2} - 1} \left[\frac{w}{w_n} \sin w_n t - \sin wt \right]$$

Cette hypothèse de l'oscillateur à un degré de liberté permet donc d'obtenir une "modélisation" analytique au problème sous sollicitation sinusoïdale. Pour valider cette approche, la structure est étudiée dans une gamme de fréquence allant de 5Hz à 100Hz. La pression appliquée l'est de manière uniforme sur la plaque. Le graphe ci-dessous donne un exemple de comparaison de la réponse en déplacement du modèle numérique Abaqus et de la solution analytique.

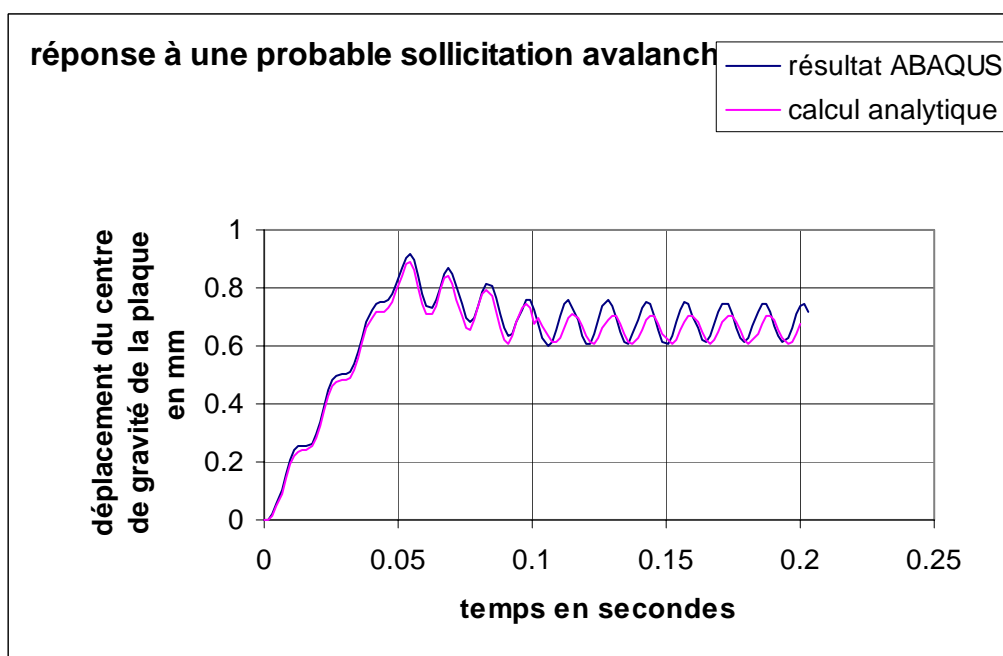


Les résultats obtenus sont plutôt bons et sous réserve d'être dans un mouvement de flexion "amont-aval", le modèle de l'oscillateur à un degré de liberté permet donc de décrire correctement le comportement de la structure. On observe cependant quelques écarts avec l'augmentation de la fréquence de la sollicitation. Ces écarts devront être mieux étudiés, notamment en fonction des gammes de fréquences mesurées expérimentalement, pour évaluer la pertinence et la précision de cette approche.

Par ailleurs, la sollicitation avalancheuse ne se réduit pas à une action sinusoïdale. La structure a donc également été étudiée sous le profil de pression type suivant :



Le graphe ci-dessous décrit le résultat obtenu :



Les résultats sont là aussi tout à fait acceptables dans notre contexte et le modèle de l'oscillateur à un degré de liberté permet de fournir une relation analytique au comportement

en flexion ‘‘amont-aval’’ de notre structure. Sans notre situation de sollicitation frontale par une avalanche, ce comportement doit bien s ur ˆtre prépondérant mais il s’agira cependant de s’en assurer en utilisant au mieux les différentes jauges placées sur la structure.

Sommairement, les étapes de l’exploitation des résultats sont les suivantes :

- Mesures expérimentales qui permettent, à partir des signaux des jauges 1 ou 2, de remonter au déplacement du centre de gravité de la plaque en fonction du temps. Une première solution est de développer un modèle là aussi analytique du même type que précédemment en exhibant les paramètres nécessaires à partir des modèles et calculs Abaqus. A noter que la simple relation de RDM qui lierait la déformation de la jauge choisie et le déplacement au centre de gravité de la plaque ne s’applique pas ici du fait des effets dynamiques. La combinaison des signaux des 2 jauges 1 et 2 doit également permettre d’obtenir des informations sur la répartition spatiale de la pression sur la hauteur de la plaque au moins pour en exhiber une évolution linéaire. Enfin, la confrontation au signal issu de l’accéléromètre en tête de poutre doit permettre de valider l’évolution du déplacement obtenue.
- A partir de cette évolution du déplacement au centre de gravité de la plaque, l’application du modèle d’oscillateur à un degré de liberté décrit précédemment permet ensuite de remonter à l’évolution temporelle de la sollicitation. Comme évoqué précédemment, cette évolution peut également ˆtre complétée de considérations spatiales.
- La sollicitation obtenue est réinjectée comme donnée d’entrée dans un calcul Abaqus pour reboucler sur les déformations des jauges 1 et 2.
- Une étape complémentaire consiste à mener les vérifications nécessaires, d’une part en comparant la sollicitation obtenue avec celle du capteur de pression et d’autre part en vérifiant l’hypothèse de flexion ‘‘amont-aval’’ en examinant les résultats des autres jauges. Cette dernière vérification sera de toute façon acquise si l’étape précédente donne de bons résultats mais il peut ˆtre également intéressant d’examiner au préalable les autres jauges pour voir si l’hypothèse de départ est correctement vérifiée. A ce titre, les jauges 4 et 11 permettent de déceler une flexion latérale (type mode 2) et la torsion (mode 1) peut ˆtre indiquée en considérant les jauges 5, 6, 7 et 8.

L’ensemble de cette méthode reste à ˆtre développée et affinée.

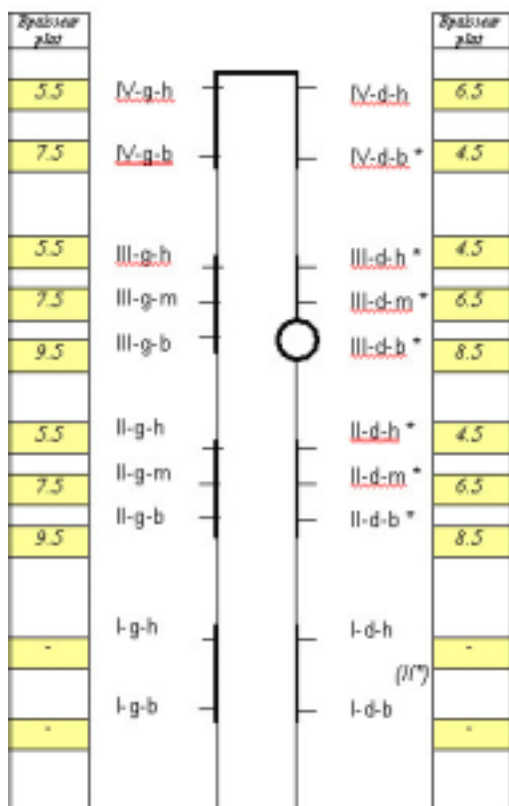
4.4.5 Conclusion

Comme le montrent les points précédents, l’utilisation de la structure plaque est plus complexe et nécessite des analyses dynamiques poussées. Cependant et moyennant des hypothèses adaptées, l’analyse en retour de son comportement paraît tout à fait envisageable pour garantir une qualité de résultat optimale. Par sa représentativité et l’originalité de la méthode, les résultats de cette expérimentation sont même très attendus et s’annoncent prometteurs. Couplée aux expérimentations sur les fusibles, cette structure plaque doit finalement permettre d’obtenir des profils spatio-temporels fiables de la pression effectivement subie par un obstacle soumis à une avalanche.

5 EXPÉRIMENTATIONS 2002-2003

5.1 Le dispositif finalement mis en place

L'hiver 2002-2003 constituait la première année d'expérimentation avec ces nouveaux principes de mesures. Par ailleurs, le site expérimental du Lautaret, en sommeil depuis quelques années nécessitait diverses remise à niveaux. Or, des conditions météorologiques difficiles, un hiver précoce et des retards de commande n'ont pas permis de mener à terme tous les travaux prévus. Ainsi, le massif support de la structure plaque n'a pu être terminé empêchant la mise en place de cette dernière. Les efforts ont donc été concentrés sur les structures fusibles dans le couloir 2 avec l'équipement suivant du tripode à partir de 20 emplacements (code et épaisseur des fusibles, indication des plats instrumentés par *).



Équipement 2002-2003 du tripode et vue hivernale.

Par ailleurs, des problèmes de gazex au mauvais moment et une certaine malchance pour réunir tous les paramètres le jour J, n'ont pas permis d'exploiter de signaux issus des jauges. Ces difficultés n'ont cependant pas empêché d'obtenir les premiers résultats sur les profils de pression maximale pour montrer le potentiel des expérimentations et surtout pour constituer une excellente expérience pour les prochaines saisons.

5.2 Avalanches déclenchées et expérimentations 2002-2003

Plusieurs avalanches ont été déclenchées dans le couloir n°2 pendant l'hiver 2002-2003. A noter qu'après chaque avalanche déclenchée, les fusibles n'ont pas toujours pu être changés pour le prochain écoulement, car les interventions sur le tripode étaient parfois trop risquées.

- Ø Un déclenchement d'avalanche a eu lieu le 14 janvier 2003. Les fusibles endommagés par l'avalanche sont repérés mais n'ont pas pu être récupérés car les conditions ne le permettaient pas. Ainsi, après cette avalanche, les fusibles endommagés n'ont pas été changés.



Avalanche du 14/01/2003 au passage de la route du Galibier

- Ø De retour sur le site le 24/01/03, de nouveaux fusibles ont été endommagés entre temps, vraisemblablement par une avalanche naturelle. Une nouvelle avalanche est déclenchée le 24/01/03 et aucun sur-endommagement n'est constaté sur les fusibles restés en place. Les fusibles endommagés des niveaux IV et III sont démontés et remplacés.

Les fusibles suivants sont donc exploitables:

III-g-h	}	avalanche du 14/01/03
III-g-m		
III-g-b		
IV-d-b	}	avalanche naturelle qui s'est produite entre le 14/01/03 et le 24/01/03
III-d-h		
III-d-m	}	avalanche du 14/01/03
III-d-b		



Niveau III du tripode après l'avalanche du 24/01/2003

Ø Le 26/02/03, à l'arrivée sur le site, plusieurs fusibles sont légèrement déformés. Par ailleurs, les fusibles II-g-m et II-g-h pourtant toujours enseveli par la neige en place sont légèrement endommagés : cela est probablement dû à la reptation du manteau neigeux. Les fusibles III-g-h, IV-d-b et III-d-h ont été endommagés par des avalanches naturelles qui se sont produites entre le 24/01/03 et le 26/02/03.

De plus, le niveau de la neige permettant d'accéder au niveau II du tripode et au vu des déformations observées, les fusibles II-g-h, II-d-h et II-d-b ont été vraisemblablement endommagés par l'avalanche du 14/01/03.

Le déclenchement prévu le 26/02/03 ne peut pas avoir lieu à cause de problèmes techniques. L'ensemble des fusibles sur le tripode est remis à neuf.

Ø Après le 26/02/03, d'autres fusibles sont de nouveau endommagés mais de manière trop disparate (avalanches naturelles non connues) pour pouvoir mener une exploitation correcte des résultats.

Pour ce rapport, nous exploiterons donc les fusibles endommagés par l'avalanche du 14/01/03, à savoir :

Fusibles de gauche	Déflexion (mm)	Fusibles de droite	Déflexion (mm)
III-g-h	89	III-d-m	157
III-g-m	159	III-d-b	62.5
III-g-b	118		
II-g-h	-	II-d-h	216
		II-d-b	50

Ces 8 fusibles ont ainsi permis de tracer un premier profil spatial de pression pour une avalanche plutôt représentative des écoulements qui se produisent sur le site du Lautaret.



Fusible III.d.b après l'avalanche du 14/01/2003

5.3 Profils de pression obtenus

Les fusibles récupérés après l'avalanche du 14 janvier 2003 ont ainsi permis de tracer un premier profil de pression :

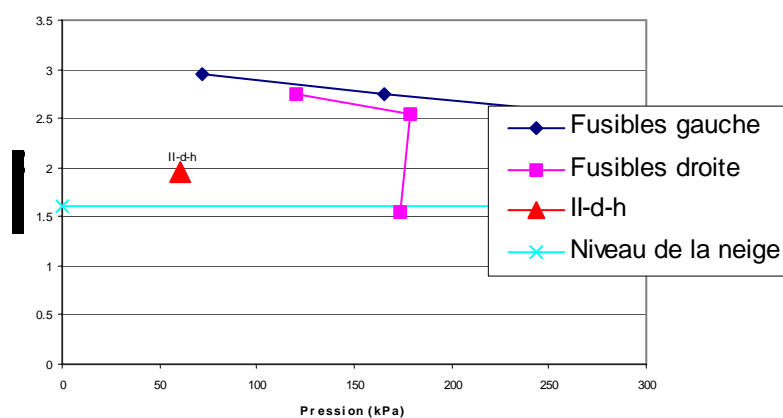
Fusibles de gauche

Désignation	épaisseur (mm)	côte (m)	flèche (mm)	Pression (kPa)
III-g-h	5.5	2.96	89	71.6
III-g-m	7.5	2.75	159	165.5
III-g-b	9.5	2.54	118	274.4

Fusibles de droite

Désignation	épaisseur (mm)	côte (m)	flèche (mm)	Pression (kPa)
III-d-m	6.5	2.75	157	120.1
III-d-b	8.5	2.54	62.5	178.9
II-d-h	4.5	1.96	216	>60.2
II-d-b	8.5	1.54	50	173.9

Profil de pression
avalanche du 14/01/03



A noter que le fusible II-d-h (en rouge sur la courbe ci-dessus) était sous-dimensionné (déflexion trop importante) et n'a pas été pris en compte pour le tracé du profil des pressions maximales. Comme indiqué précédemment il ne donne qu'une borne inférieure de la pression à son niveau.

D'après ces résultats, nous pouvons supposer que l'avalanche comportait deux couches successives :

- du niveau de la neige en place (environ 1.60 m) à un mètre au-dessus (2.60 m), la pression est presque constante, de l'ordre de 175 kPa sur la partie droite. On peut donc supposer que cette zone de 1 mètre de hauteur concorde avec la partie dense de l'écoulement et qu'elle se retrouverait sur la partie gauche.
- à partir de 1.60, la pression va en diminuant avec la hauteur, de façon quasi linéaire. Cette zone correspond à une partie moins dense de l'écoulement, probablement à la partie aérosol de l'avalanche ou à la couche de saltation au-dessus de l'écoulement dense.

On peut aussi remarquer que, pour une même hauteur, les valeurs de la pression sur la partie gauche du tripode sont plus élevées que les valeurs de pression sur la partie droite. Cette différence s'élève à environ 80 kPa. Ceci signifie donc qu'il existe une certaine distribution horizontale de la pression qu'il faudra étudier plus rigoureusement par la suite. Nous pouvons supposer que cette différence droite-gauche est due à l'écoulement qui arrive de façon déviée sur le tripode.

Les valeurs obtenues peuvent être comparées avec l'équation classique employée dans le calcul de pression dynamique :

$$F \mid C_x \cdot \frac{1}{2} \cdot \psi V^2 \cdot S \mid P_{dyn} \cdot S$$

$$P_{dyn} \mid C_x \cdot \frac{1}{2} \cdot \psi V^2$$

Avec :

- F, force s'appliquant sur le fusible (en kN)
- S, surface du fusible (en m²)
- P_{dyn}, pression dynamique (en Pa)
- ψ , masse volumique de la neige (en kg/m³)
- V, vitesse de l'écoulement (en m/s)
- C_x, coefficient de traînée, fonction du fluide et de la forme de l'obstacle.

En connaissant les valeurs de ψ et V, nous pouvons calculer la pression dynamique correspondante, grâce à l'expression de la pression de référence la plus largement utilisée :

$$P_{ref} \mid \frac{1}{2} \psi V^2 \text{ (dans ce cas, } C_x=1)$$

Pour l'avalanche du 14 janvier 2003, la vitesse a été estimée à 25-33 m/s et la masse volumique à 300-350 kg/m³ soit les valeurs de pression dynamique suivantes :

P (kPa)	93.75	109.4	163.4	190.6
v (m/s)	25	25	33	33
p (kg/m ³)	300	350	300	350

Ces valeurs correspondent bien aux ordres de grandeur trouvés à l'aide des fusibles et confirment le bien fondé de la méthode. Par ailleurs, la forme générale des premiers profils est tout à fait prometteuse pour la suite.

5.4 Conclusion

La principale conclusion qui peut être tirée de cette première année d'exploitation est que le principe de mesures choisi est très bon et doit permettre d'obtenir des résultats très intéressants mais qu'il peut encore être amélioré.

Tout d'abord, le nombre de fusibles doit être augmenté pour obtenir plus de points de mesures et affiner les profils de pression. Ensuite, tous les fusibles doivent être choisis au mieux pour avoir la bonne dose de déformation pour être exploitable (ni trop, ni trop peu...). Enfin, l'acquisition par les jauges de contraintes, sans être indispensable, doit permettre de valider les résultats obtenus et donc conforter la méthode.

6 PERSPECTIVES : SAISON 2003-2004 ET SUIVANTES

6.1 Couloir n°2 - fusibles

Au vu des résultats obtenus et pour améliorer les expérimentations "fusibles" du couloir n°2, il est prévu de multiplier le nombre d'emplacement par adaptation de l'existant et adjonction d'entretoises entre les platines, jusqu'à avoir la possibilité d'approcher les fusibles voire de les juxtaposer les uns aux autres (au moins sur un côté du tripode). L'objectif est de pouvoir offrir à l'avalanche une surface plus importante et se rapprocher de la situation d'un "vrai obstacle". Ceci permettra également d'observer l'influence de l'écartement des fusibles et donc leur influence mutuelle.

Par ailleurs, et comme nous avons pu le constater dans l'exploitation des résultats 2002/2003, certains fusibles étaient mal dimensionnés par rapport aux sollicitations qu'ils ont subies. Il est donc prévu d'adapter l'épaisseur des fusibles en fonction de la sollicitation qu'ils pourraient subir et par conséquent, en fonction de leur côte sur le tripode. Trois zones peuvent être distinguées : il faut mettre en place des fusibles de forte épaisseur (au moins 7.5 mm) dans la partie inférieure du tripode, des fusibles d'épaisseur moyenne et décroissante (de 9.5 mm à 5.5 mm) dans la partie intermédiaire et des fusibles de faible épaisseur (4.5-5.5 mm au maximum) dans la partie supérieure. Les niveaux inférieurs sur le tripode, toujours enneigés, peuvent également servir à l'étude de la reptation du manteau neigeux.

Il est également prévu de mettre en évidence la distribution horizontale de la pression dans le couloir n°2 en mettant en place des fusibles de même épaisseur sur un même niveau du tripode.

Enfin, la chaîne d'acquisition a été vérifiée et configurée de manière optimale pour assurer son fonctionnement pendant les expérimentations. Le niveau de la neige changeant au cours de la saison, il faudra aussi adapter l'ensemble du dispositif en fonction de la hauteur du manteau neigeux en place.

Pour les prochaines saisons d'expérimentations, une nouvelle « carte d'équipement » du tripode a ainsi été établie (cf. page suivante). Les emplacements de fusibles surlignés correspondent à ceux utilisés pour la saison 2003-2004. Une étoile indique que l'emplacement est câblé pour la présence d'une jauge et les tableaux suivants récapitulent les principales caractéristiques. Au total, ce sont donc 44 fusibles qui seront utilisés pour l'hiver 2003-2004.

Vue du pied amont du tripode dans le sens de l'écoulement

Epaisseur plat			Epaisseur plat
3.5 mm		capteur aérosol	3.5 mm
3.5 mm		VII-d-M-b VII-d-M-b-r	3.5 mm
		VII-d-B-b VII-d-B-r	
		VII-d-B-m	
4.5 mm		VI-d-H	4.5 mm
		VI-d-H-m	
4.5 mm		VI-d-M-h	4.5 mm
		VI-d-M-b	
4.5 mm		VI-d-B-m	5.5 mm
		VI-d-B	
5.5 mm		V-d-H-m V-d-H-r	5.5 mm
		V-d-M-h V-d-M-h-r	
6.5 mm		V-d-M-b V-d-M-b-r	6.5 mm
		V-d-B-m V-d-B-r	
6.5 mm			8.5 mm
			9.5 mm
8.5 mm		IV-d-H-m	7.5 mm
		IV-d-M-h	
		IV-d-M-b	8.5 mm
8.5 mm		IV-d-B-m	8.5 mm
			9.5 mm
9.5 mm		III-d-H-m III-d-H-r	9.5 mm
		III-d-H-b III-d-M-h-r	10.5 mm
		III-d-M-h	7.5 mm
8.5 mm		III-d-M-b III-d-M-b-r	8.5 mm
		III-d-B-h III-d-B-r	11.5 mm
		III-d-B-m	7.5 mm
10.5 mm			10.5 mm
		II-d-H	
11.5 mm		II-d-H-m	9.5 mm
		II-d-M-h	
10.5 mm		II-d-M-b	7.5 mm
		II-d-B-m	
		II-d-B	
9.5 mm		I-d-H-m I-d-H-r	5.5 mm
		I-d-H-b I-d-M-h-r	
		I-d-M-h	
7.5 mm		I-d-M-b I-d-M-b-r	11.5 mm
		I-d-B-h I-d-B-r	
		I-d-B-m	
4.5 mm			6.5 mm

A gauche

Emplacement/ tripode	Fixation	côte z	épaisseur plat e	barre - épaisseur gorge encastrement E	Jauge	N°Voie
I-g-b	platine	0.54 m	4.5 mm	6 mm	oui	VII
I-g-m	platine	0.75 m	7.5 mm	8 mm		
I-g-h	platine	0.96 m	9.5 mm	10 mm		
II-g-b	entretoise	1.17 m	10.5 mm	12 mm		
II-g-h	entretoise	1.34 m	11.5 mm	12 mm		
III-g-b	platine	1.54 m	10.5 mm	12 mm		
III-g-m	platine	1.75 m	8.5 mm	10 mm	oui	VI
III-g-h	platine	1.96 m	9.5 mm	10 mm		
IV-g-b	entretoise	2.17 m	8.5 mm	10 mm	oui	V
IV-g-h	entretoise	2.34 m	8.5 mm	10 mm	oui	IV
V-g-b	platine	2.54 m	6.5 mm	8 mm	oui	III
V-g-m	platine	2.75 m	6.5 mm	8 mm	oui	II
V-g-h	platine	2.96 m	5.5 mm	6 mm		
VI-g-b	entretoise	3.17 m	4.5 mm	6 mm	oui	I
VI-g-h	entretoise	3.34 m	4.5 mm	6 mm		
VII-g-b	platine	3.54 m	4.5 mm	6 mm		
VII-g-m	platine	3.75 m	3.5 mm	6 mm		
VII-g-h	platine	3.96 m	3.5 mm	6 mm		

A droite

Emplacement/ tripode	Fixation	côte z	épaisseur plat e	barre - épaisseur gorge encastrement E	Jauge	N°Voie
I-d-b	platine	0.54 m	6.5 mm	8 mm		
I-d-m	platine	0.75 m	11.5 mm	12 mm		
I-d-h	platine	0.96 m	5.5 mm	6 mm		
II-d-b	entretoise	1.17 m	7.5 mm	8 mm		
II-d-h	entretoise	1.34 m	9.5 mm	10 mm		
III-d-b	platine	1.54 m	10.5 mm	12 mm		
III-d-b21	platine	1.61 m	7.5 mm	8 mm		
III-d-b22	platine	1.68 m	11.5 mm	12 mm		
III-d-m	platine	1.75 m	8.5 mm	10 mm		
III-d-h21	platine	1.82 m	7.5 mm	8 mm		
III-d-h22	platine	1.89 m	10.5 mm	12 mm		
III-d-h	platine	1.96 m	9.5 mm	10 mm		
IV-d-b1	entretoise	2.05 m	9.5 mm	10 mm		
IV-d-b	entretoise	2.17 m	8.5 mm	10 mm		
IV-d-h	entretoise	2.34 m	8.5 mm	10 mm		
IV-d-h2	entretoise	2.45 m	7.5 mm	8 mm		
V-d-b	platine	2.54 m	9.5 mm	10 mm		
V-d-b12	platine	2.645 m	8.5 mm	10 mm		
V-d-m	platine	2.75 m	6.5 mm	8 mm	oui	VIII
V-d-h12	platine	2.855 m	6.5 mm	8 mm		
V-d-h	platine	2.96 m	5.5 mm	6 mm		
VI-d-b	entretoise	3.17 m	5.5 mm	6 mm		
VI-d-h	entretoise	3.34 m	4.5 mm	6 mm		
VII-d-b	platine	3.54 m	4.5 mm	6 mm		
VII-d-m	platine	3.75 m	3.5 mm	6 mm		
VII-d-h	platine	3.96 m	3.5 mm	6 mm		

6.2 Couloir n°1 – structure plaque

Les travaux menés permettront la mise en place de la structure plaque dans le couloir 1 et son exploitation pour l'hiver 2003-2004. Ce couloir sera déclenché à l'aide d'un avalhex, lui-même remis à niveau.

6.3 Sécurité

Ce point est essentiel pour des expérimentations menées dans des couloirs d'avalanches et aucune mesure ne justifiera jamais une prise de risque pour les personnels. Toutes les consignes de sécurité nécessaires sont d'ailleurs appliquées (port de l'Arva, contact radio avec les moyens de secours, vigies...) et ceci a déjà conduit à annuler certaines manipulations ou à modifier leur déroulement (non-changement des fusibles endommagés entre deux avalanches par exemple).

Le premier problème est de pouvoir accéder à l'abri ce qui nécessite quand même de traverser 2 couloirs d'avalanche. Ce souci pourra être limité en 2003-2004 avec la présence d'un déclencheur opérationnel dans le couloir 0 permettant de mener un déclenchement préventif. Le couloir n°1 est ensuite suffisamment étroit pour être traversé de manière raisonnable.

De toute façon, l'accès à l'abri est à notre avis indispensable : une solution basée sur le déclenchement à distance de l'acquisition présente plusieurs inconvénients (surcoût, matériels en veille permanente dans l'abri, accès logiciel réduit donc peu de possibilité de (re)configuration...) et il faut de toute façon rejoindre l'abri pour mettre en place les caméras et faire les manipulations nécessaires sur les fusibles.



Traversée des couloirs 0 et 1 (abri complètement enneigé...)

6.4 Prises de vue

La question des prises de vue reste délicate, à la fois pour les problèmes de sécurité évoqués précédemment et pour l'exploitation de ces images. En effet, les prises de vues éloignées souffrent souvent du manque de contraste alors que les prises de vues proches peuvent être

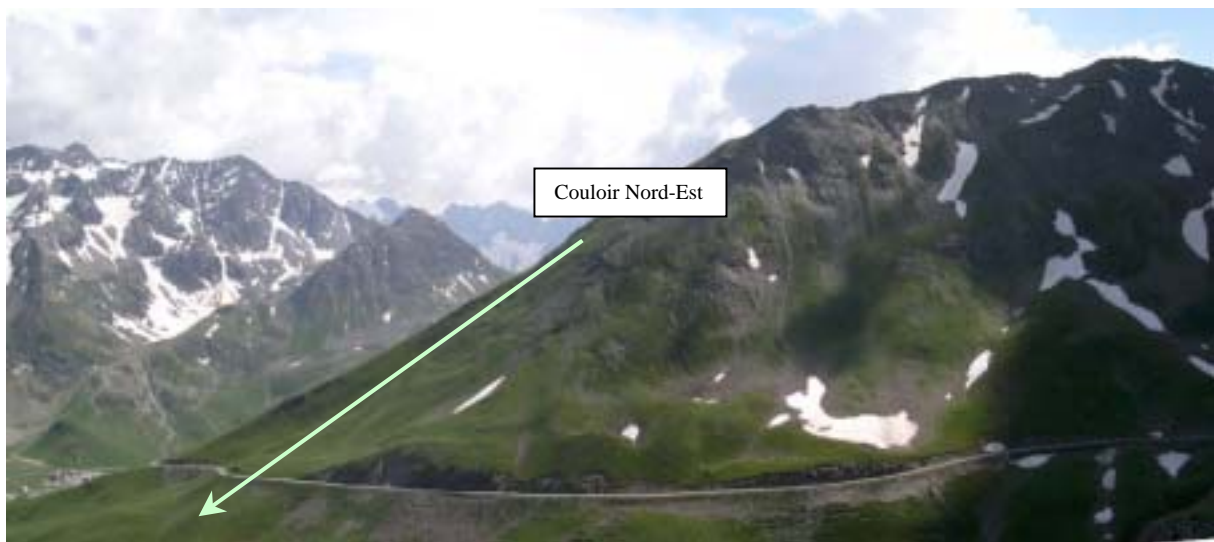
perturbées par les couches de saltation ou aérosol qui vont former une sorte de brouillard cachant tous les phénomènes intéressant l'obstacle. Ce point sera donc encore testé et amélioré en 2003-2004.



Caméra derrière son étrave de protection

6.5 Couloir Nord-est

Le développement du site expérimental du Lautaret passe aussi par l'équipement de nouveaux couloirs pour pouvoir multiplier les expérimentations et pour pouvoir profiter de plus d'avalanches, éventuellement de types différents. A ce titre, le couloir nord-est apparaît des plus intéressants pour plusieurs raisons.



La crête de Chaillol-

En effet, de par sa taille, ce couloir se rapproche des grands sites expérimentaux européens, comme le site de la vallée de la Sionne (Suisse) ou le site de Riggfonn (Norvège). Par ailleurs, il possède une orientation différente des autres couloirs d'avalanche de la crête de Chaillol, qui permet de conserver une neige plus froide et d'obtenir des avalanches plus imposantes, y

compris des aérosols. Enfin, l'absence complète d'enjeux dans le voisinage permet de pouvoir y mener ces expérimentations sans contraintes fortes, notamment au niveau de la RN 91.

Ce couloir a déjà été utilisé mais peu de mesures y ont eu lieu. Lors de la saison d'expérimentations 1975-1976, la mise en place d'un Catex et d'une console supportant des appareils de mesures a ainsi permis de faire quelques mesures de pression et de vitesse. Toutefois, à l'occasion du déclenchement du 18 février 1976, la console support, ainsi que les appareils de mesures, ont été détruits. Des mesures ont cependant pu être effectuées pendant 0.3 s pour la pression et 5 s pour les vitesses avant que les appareils ne soient endommagés.

L'avalanche du 16 février 1976⁷

Conditions nivométéorologiques à 19 h (avant le tir)

Etat du couloir : Epaisseur moyenne de neige au niveau de la console : environ 200 cm. Les pentes en amont semblent plus chargées. L'épaisseur de neige récente est de l'ordre de 50 à 60 cm (chute des 13 et 14 février).

Température de l'air : - 6.2 °C

Température de surface de neige : - 6.1 °C

Caractéristiques de l'avalanche

Zone de départ : rupture de plaques de 60 à 80 cm de neige récente et de faible cohésion. A mi-parcours, sous le poids de la neige en mouvement, la couche sous-jacente se rompt et une nouvelle couche de 30 cm environ est entraînée. L'avalanche très importante descend lentement entraînant de gros blocs très compacts.

Zone intermédiaire : la console de mesures Nord-Est droite disparaît sous l'avalanche.

Zone d'arrêt : l'avalanche descend très bas dans le vallon ; longueur totale : environ 500 m

Résultats expérimentaux

La console Nord-Est droite, disparue dans l'avalanche, a néanmoins permis de mesurer :

La pression pendant 0.3 s : 2 bars soit 200 kPa. Il ne s'agit pas cependant de la pression maximale puisque la console était encore apparente. Les câbles de mesure de pression ont été arrachés à T=0.4 s.

Les vitesses. Les mesures ont pu être effectuées de T=0 s à T=5 s (disparition complète de la console Nord-Est droite à T=5.2 s). La vitesse moyenne mesurée pendant cet intervalle de temps est de 6 m/s, la vitesse maximum ayant atteint 12 m/s.

Enfin, par mesure de sécurité, la pente n'étant pas purgée complètement, l'accès à la zone de mesures a été interdit après l'avalanche, aucune mesure de densité et de température n'a donc été effectuée.

⁷ D'après la note CENG/ASP n°77-03, *la dynamique des avalanches. Résultats expérimentaux du Col du Lautaret. Année 1976.* par A. Eybert-Bérard, R. Mura, P. Perroud, L. Rey.

Ainsi, cet exemple illustre la plus grande ampleur des avalanches de ce couloir et leur intérêt pour des expérimentations concernant des obstacles soumis aux avalanches. Pour la saison 2003-2004, un Avalhex autonome sera installé pour permettre son déclenchement en sécurité. Faute de temps, aucune expérimentation particulière ne sera mise en place mais ces déclenchements et les prises de vue qui pourront en être faites permettront d'accumuler une expérience très utile pour la suite.

Ces futures expérimentations pourront notamment étudier les effets tangentiels d'une avalanche sur un obstacle pour contribuer à un meilleur dimensionnement des galeries paravalanches. La topographie du couloir nord-est, plus accessible que celle des autres couloirs dans la zone possible de mesures, paraît en effet relativement adapté pour la mise en place de telles expériences. De même, la présence à proximité de la route du Galibier est le gage d'un accès et de travaux facilités.



Couloir nord-est depuis la route du Galibier

D'un point de vue logistique, tout est à prévoir mais une rapide étude a pu montrer la faisabilité d'une telle installation à un coût limité: l'électricité pourra être amenée depuis l'abri existant jusqu'à proximité de l'abri technique du gazex. Moyennant son réaménagement, le matériel d'acquisition nécessaire pourrait alors y prendre place pour être en sécurité et à distance raisonnable du matériel de mesure. A noter que pour éviter des déplacements incessants (et largement préjudiciables...) de la centrale d'acquisition actuelle, il sera cependant préférable d'acquérir du nouveau matériel pour garantir des manipulations plus faciles.

7 CONCLUSION

Les expérimentations et les développements théoriques menés lors de la saison 2002-2003 ont permis de mieux appréhender le potentiel de notre nouveau principe de mesures de la sollicitation avalancheuse par analyse en retour du comportement de structures métalliques. L'originalité de ce principe est même, à notre avis, un des meilleurs moyens pour garantir que le résultat est la pression réellement subie par la structure concernée. Les premiers résultats, obtenus dans des conditions difficiles, sont donc largement prometteurs à l'aube d'une nouvelle saison qui s'annonce sous les meilleurs auspices. A terme, ces expérimentations répondront donc sûrement à la question de la pression générée par une avalanche, en exhibant des profils spatio-temporels de pression fiables pour un meilleur dimensionnement des ouvrages en génie-civil.

D'un point de vue plus large, le site expérimental du Lautaret apparaît aussi comme un pôle important de la recherche sur les avalanches au niveau international. Par ses caractéristiques d'abord, il est un des rares sites à disposer d'autant de couloirs équipés ou en passe de l'être. Ensuite, son développement pourrait être également développé sur des thèmes connexes comme la reptation du manteau neigeux (étude des filets) ou le transport de neige par le vent. A terme, le site du Lautaret pourrait regrouper l'ensemble de la communauté scientifique concernée par les problèmes de neige et d'avalanches.

Mais c'est surtout par les équipes qui y interviennent et leur pluridisciplinarité que ce site est original. En effet, si l'unité Etna du Cemagref de Grenoble reste maître d'œuvre du fonctionnement du site, différents partenaires de la Fédération de Recherche RNVO (Risques Naturels et Vulnérabilité des Ouvrages) sont déjà impliqués et des contacts ont déjà été pris pour de futurs développements.

Bref, cette première année d'expérimentations, qui peut paraître relativement modeste par ses résultats, marque surtout le début d'une nouvelle vie pour le site du Lautaret pour, espérons le, de nouveaux progrès dans la connaissance des phénomènes et pour une meilleure gestion du risque en montagne.



Les couloirs de la Montagne de Chaillol

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.
- Amman W (1999), "A new Swiss test-site for avalanche experiments in the Vallée de la Sionne (Valais)", Cold regions Science and Technology, Selected papers presented at the International Snow Science Workshop 1998 at Sunriver (Oregon), Vol.30, pp. 3-11.
- Ancey C. (1996), "Guide neige et avalanches : connaissances, pratiques, sécurité", ouvrage collectif, Edisud, 317 p.
- Auge A. (1995), "Dynamique des avalanches, Etude de l'interaction entre les avalanches et les obstacles", mémoire de 3^{ème} année, ENGEES, 1995, 130 p.
- Batoz J.L. & G.S. Dhatt (1990): "Modélisation des structures par éléments finis" Volume 2 : Poutres et plaques. Paris Hermès.
- Bartelt P. & V. Stöckli (2001), "The influence of tree and branch fracture, overturning and debris entrainment on snow avalanche flow", Annals of Glaciology, Vol. 32, pp.209-216.
- Beghin P. & X. Olagne (1991), "Expérimental and theoretical study of the dynamics of powder snow avalanche", Cold regions science and technology, n°19, pp.317-326.
- Berthet-Rambaud P. (1999), "Endommagement des bâtiments soumis aux avalanches : réflexions sur un modèle d'évaluation pour la gestion des risques naturels", travail de fin d'études, ENTPE, 152 p.
- 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.
- Berthet-Rambaud P., J.-M. Taillandier, A. Limam, J. Mazars, L. Daudeville (2003), "Characterising the action of a snow avalanche through the analysis of metal target's behaviour", International Symposium on Snow and Avalanches, Davos (Suisse).
- Berthet-Rambaud P., J.-M. Taillandier, A. Limam, J. Mazars, L. Daudeville (2003), "Caractérisation de la sollicitation avalancheuse par analyse en retour du comportement de structures métalliques – Site du Col du Lautaret", Journée de la Société Hydrotechnique de France, Grenoble.
- 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.
- Glass B., P. Huet, M. Rat & R. Tordjeman (2000), "Retour d'expérience sur l'avalanche du 9 février 1999 à Montroc, commune de Chamonix", Rapport de l'Inspection Générale de l'Environnement, 69 p.
- Hopfinger E. (1983), "Snow avalanche motion and related phenomena", Review of Fluid Mechanics, pp. 47-76.
- Hutter K. (1991), "Avalanche dynamics", chapter 11 of hydrology of disasters, pp. 317-394.
- 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.
- Keller S., Y. Ito, K. Nishimura (1998), "Measurements of the velocity distribution in ping-pong-ball avalanches", Annals of glaciology, N°26, pp. 259-264.
- Lachamp P., M. Naaim, T. Faug, D. Laigle (2001) "Defense structures effects on avalanche flows", European Geophysical Society, XXVI assemblée générale, poster.
- Lang, T. & R.L. Brown (1980): "Snow avalanche impact on structures" J. Glaciol., **25**(93), pp. 445-455.
- Lang T.E & J.D. Dent (1980), "Scale modeling of snow-avalanche impact on structures", Journal of Glaciology, Vol. 26, N° 94, pp. 189-196.

- 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.
- McClung D., S. Kobayashi & K. Izumi (1993), "Simulation of a destructive avalanche at Maseguchi, Japan", *Annals of glaciology*, N°18, pp.17-20.
- McClung D. & P.A. Schaerer (1985), "Characteristics of flowing snow and avalanche impact pressures", *Annals of Glaciology*, N°6, pp.9-14.
- Marco O. (1994) : "Instrumentation d'un site avalancheux" Ph.D. thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- Mears A. (1992), "Snow avalanche hazard analysis for land-use planning and engineering", Colorado Geological Survey, bulletin 49, 55 p.
- Naaïm M. (1998), "Modélisation des avalanches de neige en France", Journée d'étude, Les avalanches, du phénomène à la maîtrise du risque, Grenoble, 10 p.
- Nishimura K., N. Maeno, F. Sandersen, K. Kristensen, H. Norem & K. Lied (1993), "Observations of the dynamic structures of snow avalanche", *Annals of Glaciology*, n°18, pp.313-316.
- Nishimura K., Y. Nohguchi, Y. Ito, K. Kosugi & K. Izumi, (1996) "Snow avalanche experiments at ski jump", proceedings of the International Snow Science Workshop , 8p.
- Norem H., T. Kvister y, B.D. Evensen (1985), "Measurement of avalanche speed and forces: instrumentation and preliminary results of the Ryggfonn project", *Annals of Glaciology*, N°6, pp. 19-22.
- Norem H., "Estimating snow avalanche impact pressures on towers", Rapport Du Norwegian Geotechnical Institute NGI, n°581200-18, 12 p.
- Pedersen R., J.D. Dent, T.E. Lang (1979), "Forces on structures impacted and enveloped by avalanches", *Journal of Glaciology*, vol. 22, N°88, pp. 529-534.
- Rapin F., "Poussée d'une avalanche sur un obstacle", Stage RTM Perfectionnement, ETNA-Cemagref, 2000, 6 p.
- Qiu J., J. Xu, F. Jiang, O. Abe, A. Sato, Y. Nohguchi, T. Nakamura (1997), "Study of avalanches in the Tianshan Mountains, Xinjiang, China, Snow engineering : recent advances", Balkema (Rotterdam), pp.85-90.
- Salm B., "Anlage zur Untersuchung dynamischer Wirkungen von bewegten schnee", *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*, vol 15, Fasc 4, pp. 357-375.
- Salm B., A. Burkard, H.U. Gubler (1990), "Calcul des avalanches coulantes: une méthode pour le praticien avec des exemples", Communication de l'Institut fédéral (suisse) pour l'étude de la neige et des avalanches (traduction Cemagref), n°47, 38 p.
- Schaer M. & D. Issler (2001), "Particle densities, velocities and size distributions in large avalanches from impact-sensor measurements", *Annals of Glaciology*, Vol. 32, pp.321-327.
- Schaerer P.A. & A.A. Salway (1980), "Seismic and Impact Monitoring of flowing avalanches", *Journal of Glaciology*, Vol. 26, N° 94, pp.179-187.
- Voellmy A. (1973), "Über die Zerstörungskraft von Lawinen, Schweizerische Bauzeitung", 1973. Traduit en anglais: On the destructive force of avalanches, US Dept. of Agriculture. Forest service. Alta avalanche study center, translation n°2 1964.