

Rapport sur le projet :

## **OUVRAGES DE PROTECTION CONTRE LES AVALANCHES**

### **Contribution à la caractérisation des comportements mécaniques des structures soumises à l'action de la neige**

J. Mazars<sup>1</sup>, Ph. Berthet-Rambaud<sup>2,3</sup>, L. Daudeville<sup>1</sup>, J-M. Tacnet<sup>2</sup>

1 : R&V, Laboratoire 3S, Grenoble

2 : UR ETNA, Cemagref Grenoble

3 : CETE-LRPC, Lyon



*Une des dents endommagées de Taconnaz – Photo Cemagref*

<b>TABLE DES MATIERES</b>
---------------------------

A. PROBLEMATIQUE GENERALE	3
I. Introduction	4
II. Le dispositif paravalanche de Tacconnaz et l'avalanche du 11/02/99	4
B. ETAT DES CONNAISSANCES ET VERROU SCIENTIFIQUE	6
I. Avancer sur la connaissance des actions de la neige	7
II. Simuler le fonctionnement d'ouvrages en béton en situation particulière	23
C. LES DENTS DEFLECTRICES DE TACONNAZ : MODELISATIONS ET RESULTATS	35
I. Modélisation du problème	36
II. Chargement de nature "statique-uniforme" jusqu'à rupture	38
III. Chargement de nature dynamique	41
D. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	44

A.

**A**

## PROBLEMATIQUE GENERALE

## **I. Introduction**

La connaissance des avalanches, qui en nombre de victimes est un des principaux "phénomènes à risques" en France métropolitaine, constitue un problème dont l'importance augmente avec l'étendue des zones habitées et la fréquentation en montagne. En parallèle, les éléments de prévision et de gestion de ces phénomènes et de leurs conséquences doivent donc être développés pour répondre à la fois à des questions d'aménagement du territoire et d'amélioration des niveaux de sécurité. Outre la protection "réglementaire" et les mesures temporaires (déclenchement préventif principalement), on distingue ainsi sur le terrain les moyens permanents de défense active et passive.

### **I.1. Défense active**

Cette défense vise à maîtriser, modifier ou à détecter les conditions de départ de l'avalanche. Les techniques paravalanches concernées ici peuvent s'appliquer à toutes les situations (ou presque) où une protection est nécessaire, qu'il s'agisse de pistes de ski ou de zones habitées.

A titre d'exemple, on peut citer la modification de la rugosité du sol (banquettes...), le reboisement, la fixation du manteau neigeux (râteliers, claies, filets) ou encore l'utilisation de l'action du vent (barrière à neige, virevent...).

Cependant, certains sites ne permettent pas la mise en place de tels dispositifs, soit par leurs caractéristiques topographiques soit par certaines particularités (avalanches déclenchées suite à des événements glaciaires par exemple). Dans ce cas, il s'agit de mettre en place des mesures de défense passive.

### **I.2. Défense passive**

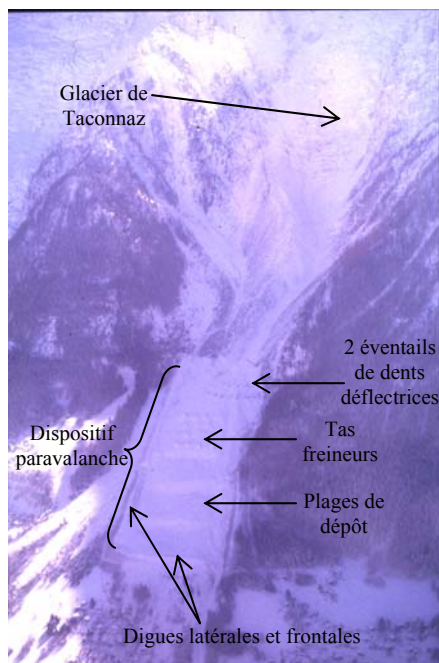
La défense passive vise ainsi à maîtriser, modifier ou à détecter l'écoulement de l'avalanche. Cela se traduit par la construction d'ouvrages particuliers de déviation (galerie, tremplin, tourne, digue, étrave, dents), freinage (tas, obstacle ajouré) ou d'arrêt (mur, digue...) pouvant également intégrer des zones de stockage ou plage de dépôt. A noter également que la défense passive comprend également les mesures d'adaptation et de renforcement des constructions.

## **II. Le dispositif paravalanche de Tacconnaz et l'avalanche du 11 février 1999**

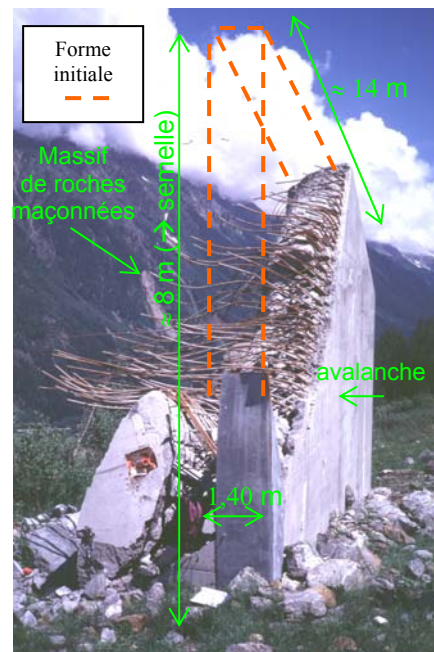
Un exemple intéressant de dispositif de défense passive est celui du couloir de Tacconnaz. Ce couloir situé à la limite des communes des Houches et de Chamonix sous le glacier du même nom produit régulièrement des avalanches dont certaines peuvent figurer parmi les plus importantes des Alpes françaises. La particularité de ces avalanches est notamment de pouvoir se développer sur un dénivelé très important (3000 mètres environ) et d'être initiées en général par une chute de sérac.

La volonté de mieux maîtriser la sécurité de ce secteur a décidé les communes des Houches et de Chamonix d'entreprendre la construction d'un imposant dispositif paravalanche achevé en 1991. Ce dispositif combine les différents types d'action citées précédemment : dents déflectrices pour dévier et étaler l'avalanche, digue latérale pour contenir l'écoulement, rangées de tas pour freiner, plages de dépôt pour stocker et digue frontale d'arrêt à l'aval.

Or, au cours du mois de février 1999, ce dispositif a subi une avalanche exceptionnelle qui a notamment débordé des limites du dispositif mais a surtout causé un certain nombre de dommages, principalement au niveau de deux dents déflectrices.



Vue générale (photo : F. Rapin – Cemagref)



Dent endommagée (photo : JM Tacnet – Cemagref)

Ces dents sont des murs en béton armé fondés sur une semelle horizontale. Le ferrailage se compose d'une couche importante d'armatures verticales et horizontales en face amont et d'une couche beaucoup plus faible en face aval. En revanche, comme pour beaucoup d'ouvrages de protection, aucun ferrailage transversal n'a été mis en place.

Vu la forme relativement analogue de la rupture observée sur les deux dents les plus endommagées, il paraît également clair que le massif en roches maçonnées mis en œuvre à l'arrière des dents comme lest a aussi joué un rôle d'appui et de renfort pour le mur lors de l'avalanche destructrice.

Cependant, ces dégâts posent surtout la question du comment : comment des ouvrages aussi imposants et normalement dimensionnés ont-ils pu être autant endommagés ? S'agit-il clairement d'une avalanche exceptionnelle dont les caractéristiques ont dépassé les hypothèses de conception ? Au contraire, la méthode habituelle de dimensionnement directement liée à l'application du règlement BAEL reste-t-elle applicable pour une sollicitation aussi dynamique ?

Cette étude n'a pas pour prétention d'apporter une réponse définitive à ces questions. Cependant, elle apporte quelques premiers éléments sur ces différents points. En premier lieu, une recherche bibliographique souligne ainsi la relative méconnaissance des caractéristiques principales de la sollicitation avalancheuse sur un obstacle. Ensuite, la présentation des outils basés sur l'utilisation des modèles d'endommagement couplés à des codes éléments finis montre les possibilités de ces approches et leurs avantages par rapport au BAEL pour les sollicitations dynamiques sur des géométries complexes 3D. Enfin, l'application aux dents déflectrices de Taconnaz fournit des résultats qualitatifs et quantitatifs pour essayer de mieux comprendre l'événement de 1999 tout en fournissant les futures directions de recherche à creuser.

# **B**

## ETAT DES CONNAISSANCES ET VERROU SCIENTIFIQUE

## **I. Avancer sur la connaissance des actions de la neige**

### **I.1. Introduction**

Le but de cette partie est de dresser un inventaire si possible exhaustif de la connaissance de l'action engendrée par une avalanche sur un obstacle pour pouvoir ensuite intégrer cette sollicitation de la manière la plus réaliste possible dans des calculs de structure. A ce jour, ce bilan n'a semble-t-il pas encore été fait ou alors dans une optique différente non reliée directement à la résistance des ouvrages (et souvent de manière inadaptée pour ce cadre). Ce travail nous paraissait donc être un préalable indispensable qui a déjà permis d'orienter certains calculs présentés dans ce rapport mais surtout qui sera une base importante pour les travaux spécifiques à venir concernant les ouvrages soumis aux avalanches. Au final et par confrontation aux résultats obtenus, cette connaissance sur la sollicitation devra être encore améliorée notamment grâce à l'analyse en retour de structures endommagées mais aussi grâce à la nouvelle campagne de mesures prévue sur le site du Lautaret et soutenue par le PGRN en 2002.

### **I.2. Génie paravalanche: poussée d'une avalanche sur un obstacle**

La vitesse et la pression sont deux paramètres primordiaux dans la connaissance d'un écoulement avalancheux.

En pratique, si ces deux paramètres peuvent être mesurés, il reste cependant un certain nombre de difficultés à surmonter. En effet, il faut déjà disposer d'un site expérimental suffisamment aménagé et du matériel adéquat pour permettre ces mesures: seulement 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 au minimum significatives et fiables. Autant de difficultés qui font qu'actuellement, le volume de données directement disponibles reste faible.

En théorie, la pression exercée sur l'obstacle est surtout obtenue à partir de la connaissance de la vitesse. Là encore, les difficultés sont surtout inhérentes à la modélisation de ces phénomènes complexes et variés, éventuellement par l'intermédiaire d'expérience à échelle réduite ou via des modèles simplifiés de fluides.

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 détaillent ainsi les éléments connus qui serviront de base, moyennant des hypothèses à préciser, aux calculs de structures.

### **I.3. Caractéristiques générales de la sollicitation**

Comme évoqué ci-dessus, la pression est, avec la vitesse, le paramètre qui va permettre d'appréhender la sollicitation d'une avalanche sur un obstacle. Cette pression doit être connue par sa répartition spatiale sur l'obstacle mais aussi par son évolution en fonction du temps sans oublier de prendre en compte la décomposition et les directions de son application.

### I.3.1 Généralités théoriques

#### I.3.1.1 Intensité de la pression

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:

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

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.

A la limite, son application semble se justifier plutôt pour donner une pression "moyenne" après "l'impact" où les variations de sollicitation sont moindres. 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.

Ensuite, pour affiner les résultats obtenus à partir de la pression de référence et tenir compte de certaines 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]:

$$P = k P_{\text{ref}}$$



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:

$$k=2\left(1+\frac{\rho_1}{\rho_2-\rho_1}\right)$$

où  $\rho_1$  et  $\rho_2$  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  $C=k$  est 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).

Ce coefficient (sans dimension) est connu pour les écoulements aérauliques et hydrauliques : pour une plaque normale à l'écoulement, il est respectivement de l'ordre de 1,6 dans l'air et 1,2 dans l'eau.

Pour les avalanches aérosols qui peuvent être considérées comme la présence discrète de particules dans un volume d'air, la valeur choisie est relativement proche de celle de l'écoulement aéraulique. Pour les avalanches denses, l'estimation n'est pas aussi simple et suivant l'approche, la forme ou le modèle de fluide utilisé, des coefficients de traînée variant de 1 à 2 ont été obtenus (parfois reliés au nombre de Reynolds 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:

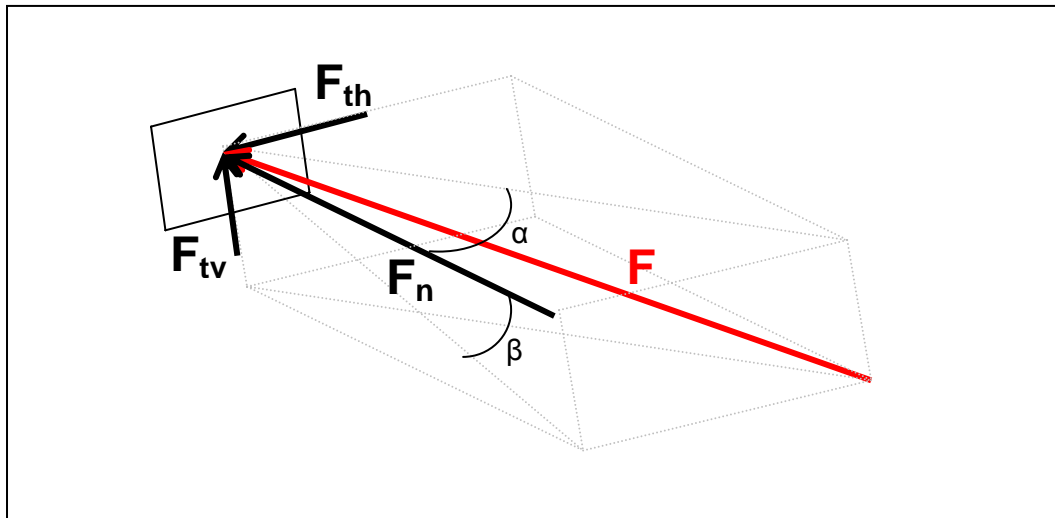
$$P = 0,2\rho v^2\left(\frac{16R}{v^{0,25}}-1\right) \text{ pour } R \text{ compris entre } 0.2 \text{ et } 1$$

En bref, il faut surtout retenir que la pression appliqué 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 "moyenne" de la sollicitation au passage de l'avalanche sur l'obstacle. Nous reviendrons sur l'évolution temporelle de cette pression notamment à l'impact de l'écoulement sur l'obstacle.

### **I.3.1.2 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  $\alpha$  et  $\beta$  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  $F = \mathfrak{F}(V)$ , on obtient donc  $F_n = \mathfrak{F}(V \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta)$ .

Pour les sollicitations tangentielles, 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. L'introduction d'un simple coefficient de frottement est donc sûrement insuffisante et à l'avenir, il s'agira aussi d'améliorer la connaissance de l'écoulement à proximité immédiate de l'obstacle pour pouvoir quantifier au mieux les efforts qu'il transmet.

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.

### **I.3.2 Les expérimentations**

#### **I.3.2.1 Expérimentations en vraie grandeur**

Comme évoqué précédemment, les conditions pour obtenir des mesures en vraie grandeur sont difficiles à réunir d'autant plus qu'elles nécessitent aussi des investissements matériels et financiers importants.

Ainsi, seuls quelques sites dans le monde sont équipés et aménagés parmi lesquels on peut citer Roger Pass au Canada [Schaerer & Salway 1980], Ryggfonn en Norvège [Norem & al.1985], La Sionne en Suisse [Ammann 1999], Kurobe Canyon [Auge 1995] et le site du Cemagref au Col du Lautaret pour la France.

Chacun de ses sites a ses caractéristiques propres permettant d'obtenir des avalanches de plus ou moins grande ampleur en écoulement dense ou aérosol mais surtout avec plus ou moins de moyens de mesures et d'acquisition de données.

Ensuite, une des grosses difficultés est la question de l'échelle et du respect du rapport entre les dimensions de l'avalanche, celles des éléments au sein de l'écoulement, la taille des dispositifs de mesures et finalement des obstacles à dimensionner.

En effet, certaines études ont pu montrer l'influence forte des dimensions des capteurs de pression utilisés d'autant plus influencés par les "particules" constituant le fluide qu'ils sont petits et que l'écoulement comporte de débris "solides" [McClung & Scheerer 1985]. Les plus petits capteurs ont ainsi tendance à surestimer les actions effectivement subies "macroscopiquement" par les structures [Schaerer & Salway 1980] et il s'agit donc de bien adapter et caler les moyens de mesure pour obtenir des valeurs d'intensité suffisamment fiables et exploitables par la suite [Marco 1994] (éventuellement en les couplant à d'autres types de mesures, par exemple optiques [Nishimura & al. 1993], [Dent & al. 1998])

Ensuite, s'il peut être intéressant de mesurer des forces localement sans faire intervenir de forme d'obstacle en utilisant des capteurs "isolés", il est peut-être encore plus important pour les cas qui nous intéressent de prendre en compte l'influence d'un obstacle dans l'écoulement et consécutivement ses répercussions sur la sollicitation réellement appliquée en retour sur sa structure.

A ce niveau, il faut donc aussi disposer de "vrais" obstacles, de formes significatives et instrumentés de manière à obtenir des éléments à la fois sur la sollicitation (avec donc la possibilité de déterminer l'influence de l'obstacle par rapport aux capteurs "isolés") et sur le comportement de l'ouvrage sous cette sollicitation. C'est vers cet objectif que tendent les nouvelles mesures mises en place sur le site du Col du Lautaret dès cet hiver 2002-2003.

#### **I.3.2.2 Simulations à échelle réduite**

Devant les difficultés à obtenir des données en vraie grandeur, différentes expérimentations sont réalisées à échelle réduite : écoulements en cuve (plutôt pour les écoulements "fluides")

type aérosols), canal à billes (plutôt pour les écoulements denses considérés alors comme granulaires)...

Ces expériences sont surtout utilisées pour améliorer la compréhension et la modélisation des écoulements. Le problème de similitude est alors basé principalement sur le nombre de Froude (rapport entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle interne du fluide) ou particulièrement pour les écoulements granulaires, celui de Reynolds (qui dans ce cadre fait intervenir le diamètre moyen des particules et la viscosité du fluide interstitiel) et le 'nombre d'aspect' (rapport entre le diamètre moyen des particules et la hauteur de l'écoulement) [Hutter 1996]. Ces nombres présentent l'intérêt d'être relativement facilement accessibles.

Concernant en revanche la modélisation de l'impact d'avalanches sur structures, les expérimentations à échelle réduite sont moins utilisées car plus difficiles à mettre en oeuvre avec la nécessité d'avoir un obstacle adapté par ses dimensions mais surtout ses caractéristiques et son instrumentation. Certaines manipulations en canal [Lang & Dent 1980] ont pu montrer des résultats encourageants mais ce sujet mériterait d'être approfondi pour réellement juger de sa pertinence. De même pour certaines expérimentations [Salm 1964] de mesure de l'impact de blocs de neige que l'on fait glisser sur un plan incliné dont certains aspects peuvent être discutés.

A noter enfin les expériences de chercheurs au Japon [Nishimura & al. 1996], [Keller & al. 1996] qui utilisent le lâché de plus de 200 000 balles de ping-pong sur un tremplin de saut à ski pour modéliser les avalanches de neige dense à une échelle suffisamment importante. Certaines mesures de pression réalisées peuvent apporter des éléments intéressants notamment sur l'évolution temporelle de la sollicitation.

### **I.3.2.3 Effets observés et ordres de grandeurs**

Les événements catastrophiques de l'hiver 1999 avec notamment l'avalanche de Montroc proche de Chamonix [Glass & al. 2000] ont encore fourni de nombreux exemples des effets possibles d'une avalanche sur les enjeux de notre société: arbres renversés ou déracinés et transportés dans l'écoulement, forêts sinistrées, bâtiments plâtrés, ébranlés, éventrés ou même déplacés et complètement détruits, véhicules parfois de gros tonnage écrasés et déplacés. Des ouvrages plus imposants de génie civil peuvent être aussi touchés comme un pont d'une trentaine de tonnes en Haute-Maurienne déplacé ou encore les deux dents déflectrices du dispositif paravalanche de Tacconnaz.

A ce niveau, il s'agit de noter que ces effets sont plutôt la conséquence de gros événements avalancheux qui sont bien souvent ceux qui nous intéressent dans le cadre de la gestion et de la prévision des risques naturels.

Or dans ces cas là, aucune analyse en retour n'est en général menée pour préciser la correspondance entre les effets observés et la sollicitation supposée à l'origine de ces résultats: d'une part, le fait de s'intéresser réellement aux interactions des avalanches avec les obstacles est relativement récent mais surtout, dans la plupart des cas et vu l'étendu des dégâts, il est difficile de retrouver des pathologies exploitables de manière significative. En ce sens, le cas des dents déflectrices de Tacconnaz est très intéressant et fait déjà l'objet de plusieurs études.

Par ailleurs, le classement des pressions d'avalanches sur le modèle des magnitudes utilisé pour les tremblements de terre à partir des effets observés [McClung & Scheerer 1993],

[Mears 1992] peut paraître intéressant au premier abord pour l'expertise "avalanche" mais est résolument insuffisant pour servir ensuite de base à des calculs de structures (d'autant plus que certains niveaux peuvent paraître assez aléatoires).

Les ordres de grandeurs de pression qui suivent ont été obtenus sur les différents sites d'observation cités précédemment:

	Pressions max mesurées <sup>1</sup>	Commentaires
Roger Pass (Canada)	300 / 700 kPa	Tous types d'avalanches sur ce site
Kurobe Canyon (Japon)	320 / 1340 kPa	Avalanches aérosols très rapides
Col du Lautaret (France)	30 / .. kPa	Avalanches d'envergure moyenne
Ryggfonn (Norvège)	220 / 540 kPa	

A noter qu'il s'agit des pressions mesurées pour les plus gros écoulements obtenus et qu'elles ne sont pas forcément représentatives de tous les événements pouvant survenir sur le site. On retrouve ainsi les mêmes disparités sur les densités (de quelques kg/m<sup>3</sup> à plusieurs centaines de kg/m<sup>3</sup>) et les vitesses (de quelques m/s à la centaine de m/s) mesurées.

En résumé, si ces données numériques sont à considérer avec prudence notamment du fait des moyens de mesure et d'expérimentation, il faut surtout garder à l'esprit la complexité du problème qui dépend à la fois du potentiel du site à générer des avalanches de différents types (Cf.II.2.1) et plus ou moins importantes, des conditions nivo-météorologiques et de déclenchement.

Ainsi, même pour les types de calculs qui nous intéressent (plutôt pour des avalanches importantes équivalant à des pressions de quelques dizaines de kPa), il s'agira de se donner un minimum d'hypothèses cohérentes avec le contexte visé. Cela rejoint finalement la démarche d'expertise telle qu'elle est menée en matière de risques naturels en général et d'avalanches en particulier (notion de scénario et d'avalanche majeurs de référence [Charlier & Marco 1995]) et qui reste encore indispensable dans l'état actuel des connaissances et des moyens.

### I.3.3.1 Précision des formules théoriques

Ici, comme le montre le tableau précédent et comme nous l'avons déjà évoqué, il faut bien distinguer pression du pic d'impact et pression moyenne dans la suite de l'écoulement. Nous considérerons dans cette partie que les formules explicitées précédemment s'appliquent à la pression P moyenne. La partie suivante détaillera l'évolution temporelle de la sollicitation avalancheuse et apportera des éléments sur cette distinction.

La formule de la pression de référence  $P_{ref}=1/2\rho V^2$  a ainsi pu être vérifiée sur le site norvégien de Ryggfonn [Norem et al. 1985] à partir de quelques avalanches ou à Roger Pass [Schaerer & Salway 1980].

Cependant et d'autres expérimentations le confirment, il semblerait que cette formule donne globalement des résultats un peu faibles: Par exemple sur le site du col du Lautaret, 25 avalanches étudiées entre 1973 et 1978 sont plutôt en accord avec la formule intégrée  $P=2P_{ref}=\rho V^2$  [Auge 1995].

<sup>1</sup> La première valeur est une pression moyenne et la seconde correspond au premier pic d'impact.

De même, la formule de Mellor qui tient compte de la compression de la neige pendant l'impact donne de meilleurs résultats pour les grosses avalanches de neige dense.

Quelques résultats semblent aussi ne s'appliquer à aucune des formules présentées et ont conduit à l'élaboration d'autres expressions empiriques: Issaenko [Auge 1995] propose ainsi  $P=(\rho V)^{1.33}$  pour les avalanches dont la vitesse dépasse 20 m/s. D'autres expériences confirmeraient également que la puissance de la vitesse est inférieure à 2 (entre 1,2 et 1,7) pour les avalanches les plus rapides.

Cependant dans l'état actuel des connaissances et avec les difficultés expérimentales liées aux mesures de pression et vitesse, il paraît plus prudent de garder une pression proportionnelle au carré de la vitesse car d'une part, certains résultats expérimentaux permettent aussi de le confirmer et d'autre part, cette relation s'appuie sur un minimum de fondements théoriques. Il reste néanmoins à encore affiner le calage de la formule avec le meilleur coefficient, difficulté qui doit tenir compte d'aspects complexes comme la traînée, l'influence éventuelle des moyens de mesure ou l'évolution des caractéristiques de la neige.

Concernant maintenant la pression maximale au pic  $P_{pic}$ , il faut signaler qu'elle est a priori tout aussi importante notamment pour les problèmes de dimensionnement de structures. En effet, même si elle est appliquée sur une courte durée, son intensité est beaucoup plus forte. A ce niveau, les calculs à mener ne pourront plus se contenter d'être simplement (pseudo)-statiques mais devront tenir compte des effets dynamiques.

Avant de revenir plus en détail sur l'évolution temporelle de la sollicitation, il faut noter que cette pression maximale est donnée le plus simplement par ratio à partir de la pression moyenne. Globalement, on peut retenir:

$$2 \leq K_{pic} = \frac{P_{pic}}{P} \leq 6$$

Les valeurs les plus basses correspondent plutôt aux écoulements de neige humide [McClung & Scheerer 1985]. Les variations observées dépendent aussi de la forme de front (liée en partie à la pente) qui va générer un impact plus ou moins important [Lang & Brown 1980].

## **I.4 – Caractéristiques spatio-temporelles de la sollicitation**

### **I.4.1 Répartition spatiale en différentes couches**

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 de la sollicitation n'est pas forcément triviale<sup>2</sup>. Ce paragraphe vise ainsi à décrire la répartition spatiale de la pression engendrée par l'avalanche en fonction de ses caractéristiques internes et des différents types d'écoulement qui peuvent la composer. Les ordres de grandeurs de pression indiqués se rapportent là encore à la pression moyenne. Cependant, nous verrons ensuite les difficultés qui viennent s'ajouter pour définir complètement la sollicitation lorsqu'il s'agit d'apprécier l'évolution de ce profil moyen au cours du temps avec notamment la prise en compte d'un premier pic d'impact

---

<sup>2</sup> Nous nous considérons dans ce paragraphe ici sur la normale à l'écoulement. Le cas échéant, les règles du II.1.1.2 doivent bien entendu en plus être appliquées.

(correspondant à la pression maximale) et l'évolution des conditions topographiques au voisinage de l'obstacle.

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

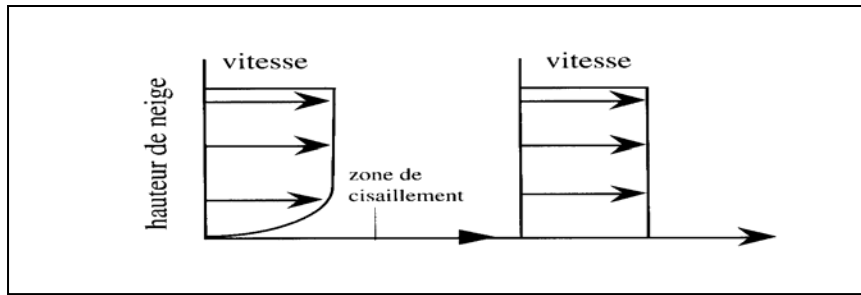
En effet, les avalanches peuvent se produire dans des conditions très variées et peuvent prendre des formes très différentes. Pour cela, nous proposons ici de reprendre la description de l'avalanche de [Norem 1990] comme une superposition de couches rapportées aux différents modes d'écoulement. Le profil de sollicitation en résultera (sous réserve de pouvoir distinguer dans la réalité ces différentes couches) :

#### I.4.1.1 Le manteau neigeux initialement présent

La première de ces 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 : 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, pour les problèmes qui nous intéressent, 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.

#### I.4.1.2. La couche dense

La couche suivante 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 transit 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.



Écoulement partiellement fluidifié et écoulement solide : profil de vitesse

Cette hauteur de couche dépend quant à elle du volume de neige en jeu, des conditions de site et de neige. Sur un cas réel, cette détermination reste encore très difficile et imprécise même si des indications peuvent être apportées par la modélisation numérique [Naaim 1998] ou certaines méthodes d'évaluation comme par exemple [Rapin 2000] en France ou [Salm & al. 1990] en Suisse. L'ordre de grandeur est de quelques mètres d'épaisseur. Ensuite, la densité de cette couche peut être relativement importante (quelques centaines de  $\text{kg par m}^3$ ).

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  $\rho gh$  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). L'ordre de grandeur de la pression sera alors de la centaine de kPa et calculé grâce aux éléments vus au II.1.1. 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 – photo F. Valla/Cemagref



Avalanche aérosol à Pralognan (73) – photo C. Vion

#### I.4.1.3 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 (En revanche, la définition du nombre de Reynolds ne peut être facilement généralisée).



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/m<sup>2</sup> [Ancy 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 d'autant 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 m<sup>3</sup> au sein du nuage) que pour la couche dense.

Là encore, la détermination de la sollicitation reste difficile : du fait de la structure tourbillonnaire de l'ensemble, la vitesse à prendre en compte est une vitesse d'écoulement, c'est-à-dire une vitesse de déplacement global. Ensuite, le terme indépendant de la vitesse évoqué pour les couches denses paraît négligeable et n'est pas pris en compte.

[Norem 1990] propose finalement de calculer la pression à la base de la couche aérosol selon une formule équivalente à celles de la couche dense (donnant des valeurs de l'ordre de quelques dizaines de kPa) puis d'appliquer une variation cubique sur la hauteur du nuage où la pression supérieure est supposée nulle.

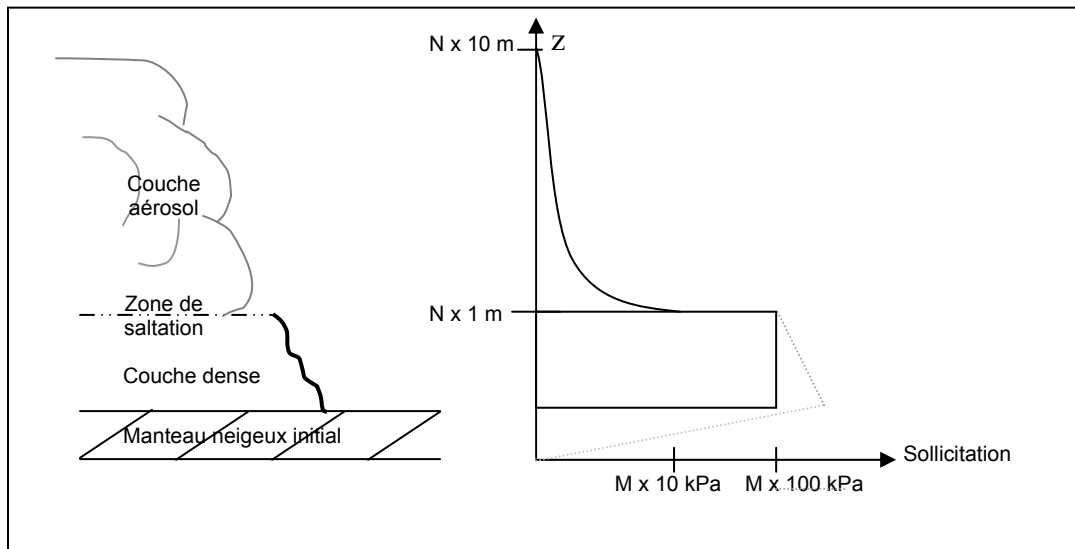
En revanche et pour bien illustrer les disparités d'évaluation dans le domaine des avalanches, les "règles françaises" [Rapin 2000] proposent d'appliquer 4 fois la pression de référence sur le dixième inférieur du nuage et la moitié de cette pression de référence sur la zone située entre  $H_{\text{nuage}}/5$  et  $H_{\text{nuage}}$  (entre les deux, zone de transition linéaire)... 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.

#### I.4.1.4 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.

A ce sujet, il faut signaler la proposition dans [Norem 1990] qui consiste à dire que le manteau neigeux initialement présent sur le sol transmet aussi une pression à l'obstacle lors de l'avalanche. Ce point n'a pu être clairement expliqué (transmission d'une contrainte de cisaillement à travers ce manteau neigeux ?) ni même validé par ailleurs et vu les difficultés

liées à l'interface écoulement-obstacle dont les conditions peuvent énormément varier, nous n'en tiendrons généralement pas compte.



**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 autonomes ayant éventuellement des trajectoires différentes et de toute façon décalées dans le temps [Ancy 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, aérosol<sup>3</sup>, 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...

<sup>3</sup> Sous-entendu initié par un écoulement dense mais qui n'atteindra pas forcément l'obstacle considéré.