Manuscrit auteur, publié dans "Neige, paravalanches et constructions (Traité MIM, série risques naturels). Nicot, F. et Limam, A. (eds) (2010) p. 15 - p. 37"

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

Table des matières

Chapitre 2. Influence des recherches et des avancées d'OPALE sur les pratiques constructives : confirmation, infirmation ou inflexion ?
Marc Givry, François Nicot

2.1. Introduction 16
2.2. L'état de l'art à l'origine 17
2.2.1. Les galeries paravalanches 17
2.2.2. Les ouvrages de bâtiment 20
2.2.2.1 Caractérisation de l'avalanche dans les documents français 21
2.2.2.2 Caractérisation de l'avalanche dans les documents suisses 22
2.2.2.3 Effet d'une déviation 23
2.2.2.4 Coefficient de frottement 23
2.3. Les approches d'OPALE 23
2.3.1. Expérimentations en situation réelle 23
2.3.2. Approches expérimentales en laboratoire 24
2.3.3. Simulations numériques 25
2.4. Les apports d'OPALE pour un constructeur 26
2.4.1. Ordres de grandeur 26
2.4.1.1 Masse volumique 26
2.4.1.2 Vitesse 26
2.4.1.3 Pression 27
2.4.1.4 Coefficient de frottement 28
2.4.2. Statique et dynamique 29
2.4.2.1 Vitesse de montée en pression 31
2.4.2.2 Importance des effets dynamiques 31
2.4.2.3 Retour d'expérience 31
2.4.2.4 Recommandations 33
2.4.3. Géométrie 34
2.5. OPALE, confirmation, infirmation ou inflexion ? 35
2.6. Bibliographie 37

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

Chapitre 2

Influence des recherches et des avancées d'OPALE sur les pratiques constructives : confirmation, infirmation ou inflexion ?

2.1. Introduction

L'ensemble des auteurs de ce traité ont été réunis dans le cadre du projet de recherche OPALE, labellisé et soutenu par l'Agence Nationale pour la Recherche. Ce projet, dont l'acronyme signifie dédié aux Ouvrages de protection et bâtiments Pavillonnaires soumis à l'Action des avaLanchEs, s'est déroulé sur 3 années (2006-2008). Il s'est inscrit dans une logique forte de coopération régionale et il faisait suite à une série de projets collaboratifs sur ce thème, notamment le projet RGCU PRANE.

À l'origine le projet OPALE se donnait trois objectifs scientifiques et techniques :

– l'étude de l'action d'une avalanche sur un ouvrage ;

– l'amélioration des méthodes de conception des ouvrages de défense vis-à-vis des avalanches de neige ;

– l'analyse de la vulnérabilité physique d'une construction en maçonnerie, en fonction de paramètres architecturaux.

Les résultats attendus étaient au nombre de quatre :

– la détermination de l'action tangentielle d'une avalanche sur un obstacle lors d'un impact défléchi ;

– l'application au dimensionnement et à l'amélioration des dispositions constructives des galeries ;

– la détermination de la sollicitation à prendre en compte lors de l'impact normal d'une avalanche sur un obstacle rigide ;

Chapitre rédigé par Marc GIVRY (Architecte) et François NICOT (Cemagref).

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

– l'application à l'analyse de la vulnérabilité physique des bâtiments en maçonnerie.

Pour améliorer la connaissance des avalanches et qualifier des méthodologies, expérimentales ou numériques, le projet OPALE s'est basé sur le couplage entre des expérimentations en situation réelle, des approches expérimentales en laboratoire et des simulations numériques.

Par ailleurs, en associant et en confrontant le domaine de la mécanique des fluides complexes à celui de l'étude du comportement des structures, il avait pour ambition de mieux caractériser la nature des sollicitations à prendre en compte pour le dimensionnement des ouvrages soumis au risque avalancheux.

Dans le présent chapitre, on considérera les résultats de ce projet de recherche en adoptant le point de vue d'un constructeur édifiant des structures paravalanches ou des ouvrages en maçonnerie. Notre questionnement sera donc le suivant :

« quels enseignements tirer d'OPALE, confirmation, infirmation, ou inflexion ? ».

2.2. L'état de l'art à l'origine

Pour pouvoir parler des retombées du projet OPALE sur les pratiques constructives, il est important de rappeler les pratiques en vigueur pour l'étude et le dimensionnement des ouvrages, et d'indiquer les principaux documents auxquels les constructeurs se réfèrent.

2.2.1. Les galeries paravalanches

Pour les galeries paravalanches, un document de référence est celui de l'OFROU, l'office fédéral suisse des routes, intitulé « Directive - Actions d'avalanches sur les galeries de protection » [OFR 07].

Publié à l'origine en 1994, il a été modifié en 2007, les modifications portant sur l'adaptation à la norme SIA 261[1] et l'intégration de nouveaux résultats de la recherche[2].

1. La norme SIA 261 intègre le calcul aux états limites, avec une approche similaire aux Eurocodes.
2. Ces résultats concernent principalement la géométrie du changement de pente en amont de l'ouvrage.

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

En Suisse, cette directive a force obligatoire pour déterminer les actions d'avalanches sur les galeries aménagées pour protéger les lignes ferroviaires et les galeries de protection des routes.

Dans cette directive, un expert en avalanches définit les caractéristiques cinématiques de l'avalanche. Il donne, pour le cas normal et pour le cas accidentel, la section de référence, l'épaisseur de l'avalanche et la vitesse de l'avalanche.

L'auteur du projet (le maître d'œuvre) détermine les actions sur la base des caractéristiques de l'avalanche (hauteur, vitesse) données par l'expert, en prenant en compte pour les charges volumiques et les coefficients de frottement des valeurs indicatives données par la directive.

l_A	[m]	Distance horizontale entre la section de référence et l'arrière de la galerie
d_L	[m]	Epaisseur de l'avalanche
v_L	[m/s]	Vitesse de l'avalanche
α	[°]	Angle de cassure de pente
β	[°]	Pente du terrain sur la galerie

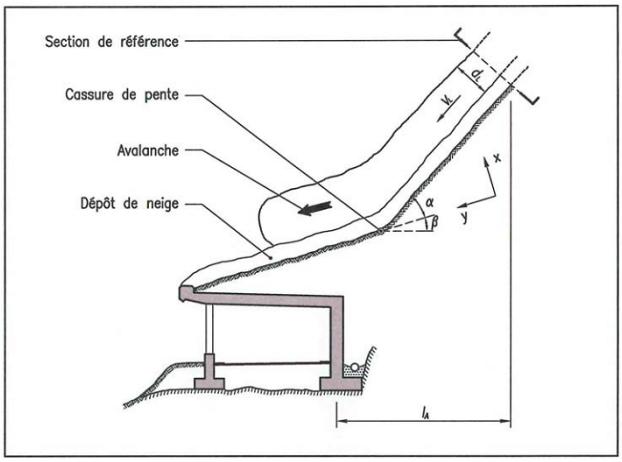

Figure 2. 1 *Données initiales à la section de référence pour une avalanche coulante*

Type de neige	Charge volumique γ [kN/m^3]
Avalanche coulante (sèche)	g_L = 3,0
Avalanche coulante (mouillée)	g_L = 4,5
Couverture neigeuse naturelle	g_S = 4,0
Dépôt d'avalanches	g_A = 5,0

Tableau 2.1 *Charges volumiques moyennes de la neige*
(g_L de l'avalanche, g_S de la couverture neigeuse naturelle, g_A du dépôt d'avalanches)

Surfaces de glissement	Coefficient de frottement μ pour différents types de neige	
	sèche	mouillée
Avalanche coulante sur couche neigeuse	0,20	0,35
Avalanche coulante sur surface plane (p. ex. béton, prairie)	0,25	0,45
Avalanche coulante sur surface irrégulière (p. ex. enrochement, éboulis)	0,35	0,55

Tableau 2.2 *Coefficients de frottement moyen*

Le maître d'oeuvre détermine aussi les conditions géométriques du site de la galerie (longueur de la zone de déviation, angle de cassure de pente et pente du terrain sur la galerie) et il calcule les forces qui s'appliquent perpendiculairement et parallèlement à la surface du terrain, en s'appuyant sur les formules de calcul données par la directive.

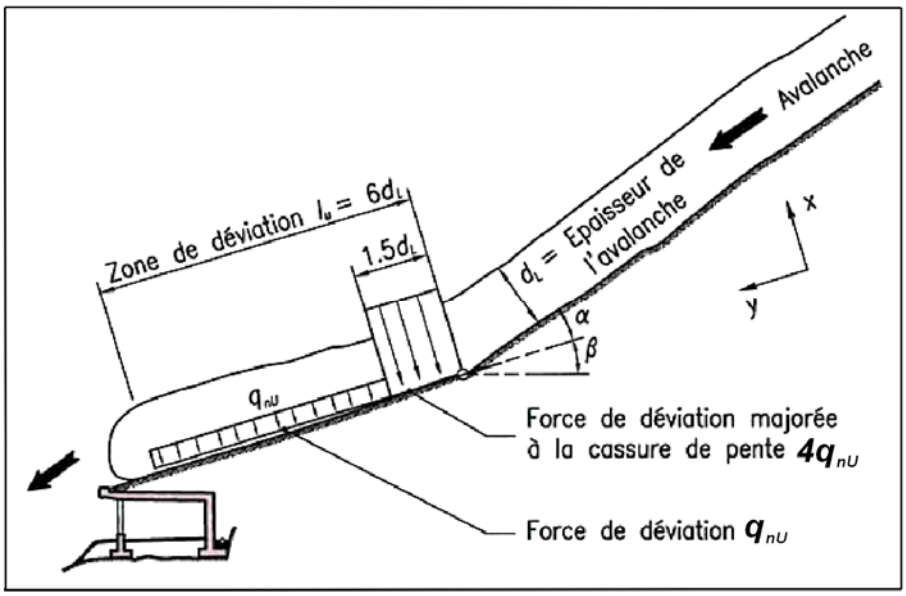

Figure 2. 2 *Zone de déviation et répartition des forces de déviation*

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

Action	Perpendiculaire à la surface du terrain	Parallèle à la surface du terrain	
Couverture neigeuse naturelle	$q_{nS} = \gamma\ d_S \cos\beta$	$q_{pS} = q_{nS} \tan\beta$	[kN/m^2]
Dépôt d'avalanches	$q_{nA} = \gamma\ d_A \cos\beta$	$q_{pA} = q_{nA} \tan\beta$	[kN/m^2]
Avalanche coulante	$q_{nL} = \gamma\ d_L \cos\beta$	$q_{pL} = \mu\ q_{nL}$	[kN/m^2]
Forces de déviation (cf. fig. 8.4)	$q_{nU} = \frac{\gamma \cdot d_L \cdot v_L^2 \cdot \sin\alpha}{6 \cdot d_L \cdot g}$ $g = 9{,}81\ m/s^2$	$q_{pU} = \mu\ q_{nU}$	[kN/m^2]

Tableau 2.3 *Formules de calcul pour les actions d'avalanches*
(d_S épaisseur de la couverture neigeuse, d_A du dépôt d'avalanches, d_L de l'avalanche)

Pour calculer une galerie paravalanche la pratique usuelle est donc la suivante :

– la vitesse et la hauteur de l'avalanche sont déterminées « à dire d'expert » ;

– les masses volumiques de la neige en mouvement et à l'arrêt sont prises sur des bases forfaitaires comprises entre 300 et 500 kg/m^3 ;

– le calcul est fait sur la base d'une pression statique équivalente ;

– les coefficients de frottements qui déterminent l'action tangentielle par rapport à l'action normale sont pris sur des bases forfaitaires comprises entre 0.20 et 0.55 ;

– une force de déviation dynamique est prise en compte sur une longueur égale à 6 fois la hauteur de l'avalanche, comptée à partir de la cassure de pente. Cette force est choisie proportionnelle au terme ρv^2 et elle se traduit aussi par une pression statique équivalente. Cette force est majorée par 4 sur une longueur égale à 1,5 fois la hauteur de l'avalanche près de la cassure de pente.

2.2.2. Les ouvrages de bâtiment

Pour les ouvrages de bâtiment soumis à un risque d'avalanche, le document de référence en France est un document rédigé par Marc Givry et Pascal Perfettini, publié en 2004 par le Cemagref et les Ministères de l'Ecologie et de l'Equipement, intitulé « Construire en montagne – la prise en compte du risque d'avalanche » [GIV 04][3].

3. À la suite de la catastrophe de Montroc en 1999, l'État a demandé un rapport à l'inspection générale de l'environnement. Une des propositions de ce rapport était l'élaboration et la diffusion d'un document reprenant l'ensemble des prescriptions techniques et architecturales à prendre en compte pour des constructions soumises à un risque d'avalanche.

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

Ce document n'a pas de caractère obligatoire ou normatif. Il s'agit plutôt d'un ensemble de recommandations qui reflètent les pratiques constatées et l'expérience accumulée.

En Suisse, le document qui fait référence s'intitule « Recommandations - Protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels » [EGL 05]. Il a été rédigé par Dr Thomas Egli et publié en 2005 par VKF-AEAI[4].

Comme l'indique son titre et comme le rappelle sa préface, ces recommandations sont dépourvues de caractère obligatoire[5] et il est présenté comme la mise à jour d'un document éprouvé par des professionnels.

2.2.2.1 Caractérisation de l'avalanche dans les documents français

En France, la caractérisation de l'avalanche dans les documents officiels (type PPR, Plan de Prévention des Risques) est donnée par une *pression de référence*, qui est souvent prise proportionnelle à la pression cinétique générée par l'écoulement. La *pression d'impact* est proportionnelle à cette pression de référence avec un coefficient qui dépend de la position relative du bâtiment par rapport au flux, de la forme de l'obstacle et de la nature de l'écoulement.

En général, pour les zones soumises à un risque d'avalanche mais néanmoins considérées comme constructibles avec des mesures constructives particulières (zones bleues des PPR) la valeur maximale de la *pression de référence* est de 30 kPa (environ 3 t/m²) pour les avalanches coulantes.

Cette valeur de 30 kPa est une valeur arbitraire qui à l'origine a été fixée en Suisse dans les années 1954 à 1968 : à l'époque on estimait que c'était la limite constructive pour un bâtiment courant, une valeur qu'il ne fallait donc pas dépasser pour les zones constructibles.

---

4. Le sigle VKF-AEAI signifie Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen - Association des Etablissements cantonaux d'Assurance Incendie, une association qui regroupe les établissements d'assurances de 19 cantons suisses. En effet, pour une majorité de cantons en Suisse, l'assurance des risques naturels est gérée à l'échelle cantonale.

5. Pour renforcer le caractère de « recommandations » du document, il commence par une page « Exclusion de la responsabilité » qui indique : *La présente publication a été élaborée avec le plus grand soin. Elle correspond à l'état actuel de la science et de la technique. Cependant, il est souligné expressément que des dommages peuvent survenir même si les mesures proposées sont respectées. En règle générale, les mesures proposées ne permettent d'empêcher des dommages ou de diminuer leur ampleur que jusqu'à un certain point; elle ne garantissent aucunement qu'aucun dommage ne surviendra.*

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

Depuis, cette valeur arbitraire s'est imposée comme valeur de référence dans le monde et le problème a été retourné pour devenir le suivant : soit une pression de 30 kPa, quelles sont les zones où cette pression a des risques d'être atteinte (zone bleue constructible sous condition) ou dépassée (zone rouge inconstructible) ?

2.2.2.2 Caractérisation de l'avalanche dans les documents suisses

En Suisse, la caractérisation des avalanches est normalement fixée par les cartes de dangers. Elle peut aussi se faire par un spécialiste des dangers naturels.

Pour les avalanches coulantes, on indique la *hauteur d'écoulement*, la *vitesse* et la *masse volumique*. Au lieu de la vitesse, on donne parfois la *pression* exercée sur un grand obstacle plan disposé perpendiculairement à la direction d'écoulement (il s'agit donc d'une *pression d'impact*).

Dans le cas d'un impact, la pression exercée par l'avalanche dépend de la vitesse de l'avalanche, de sa densité et de la forme de l'ouvrage contourné, exprimée par le coefficient de résistance c_d avec la formule :

$$q_f = 0.5\ 3c_d\ 3\rho_f\ 3\ v_f^2 \quad \text{exprimée en kPa}$$

Pour les constructions de base rectangulaire touchées par une avalanche coulante, la valeur de c_d est généralement comprise entre 2 et 3 et on prend une masse volumique $\rho_f = 0.3$ t/m^3.

À titre d'exemple, pour une vitesse $v_f = 10$ m/s, on obtient :

$$q_f = 0.5\ 32\ 30.3\ 3\ 100 = 30 \text{ kPa}$$

Pour les classes d'intensité, l'intensité est considérée comme faible lorsque la pression est inférieure à 3 kPa ; elle est moyenne pour une pression comprise entre 3 et 30 kPa, et l'intensité devient forte pour des pressions dépassant 30 kPa.

Pour les avalanches en aérosol, on donne une valeur indicative concernant le *souffle* auquel il faut s'attendre, c'est à dire les turbulences d'air et de neige diluée accompagnant le corps de l'écoulement. On indique que la pression générée par l'effet de souffle précédant la partie dense de l'écoulement est souvent surestimée et qu'elle ne dépasse guère 5 kPa.

Pour les calculs on utilise les valeurs des coefficients c_d qui sont données par les normes sur les effets du vent, en considérant qu'une avalanche poudreuse agit de la même manière que l'air si ce n'est que la masse volumique est légèrement supérieure.

2.2.2.3 Effet d'une déviation

En France comme en Suisse, pour les surfaces non perpendiculaires à la direction d'écoulement, on tient compte de l'angle de déviation α en multipliant la pression par $\sin^2\alpha$.

2.2.2.4 Coefficient de frottement

En France, on calcule l'effort tangentiel par rapport à l'effort normal en appliquant un coefficient de frottement μ compris en 0,2 et 0,4.

En Suisse, on prend μ = 0.3 pour l'interface neige/neige et l'interface neige/béton. On prend μ = 0.4 pour l'interface neige/sol grossier ou surface rugueuse.

2.3. Les approches d'OPALE

Le projet OPALE a été fondé sur le croisement de trois approches :

– des expérimentations en situation réelle ;

– des approches expérimentales en laboratoire ;

– des simulations numériques.

2.3.1. Expérimentations en situation réelle

Dans le cadre du projet, deux dispositifs ont été mis en place sur le site du Lautaret[6] :

– un capteur frontal de 1 m x 1 m qui recevait les avalanches « de plein fouet » et qui permettait d'étudier la pression d'impact ;

– un capteur tangentiel de 1 m x 2 m qui fonctionnait comme une balance bidirectionnelle pour « peser » l'avalanche en mouvement et mesurer les efforts normaux et tangentiels.

Les dispositifs techniques implantés sur le site, les procédures réglementaires à respecter pour les déclenchements et bien sûr les conditions de neige, ont permis en moyenne 2 à 3 journées de déclenchements d'avalanche par hiver.

[6] Le site d'étude des avalanches du Col du Lautaret et les dispositifs de mesure mis en place sont décrits au chapitre 4.

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

Les campagnes de tir réalisées pendant la durée du projet ont donné des résultats exploitables de grande qualité, après des traitements basés sur les techniques d'analyse inverse[7].

Il s'agit donc d'expérimentations « lourdes » dont les résultats sont nécessairement en nombre restreint mais qui offrent l'avantage irremplaçable de fournir des données récoltées en situation réelle[8].

2.3.2. Approches expérimentales en laboratoire

Pour s'affranchir des fortes contraintes opérationnelles des expérimentations en situation réelle et permettre de multiplier à loisir les expériences, le projet OPALE a développé en parallèle une démarche d'expérimentation sur modèle réduit, dans un canal d'écoulement en utilisant un matériau analogue[9].

Le matériau granulaire utilisé était constitué de billes de verre. Des dispositifs de mesure avec faisceau laser et caméra rapide permettaient de déterminer des profils des vitesses et des profils de masse volumique de l'écoulement. Des capteurs d'efforts permettaient de mesurer les efforts normaux et tangentiels à la base du canal.

Le dispositif a très bien fonctionné et il a permis de nombreux enregistrements avec des paramètres variables (hauteur de l'écoulement, position de la cible...).

D'une manière générale, il reproduit assez bien la forme « analogue » des efforts dans le temps. La correspondance reste toutefois difficile à établir entre les études menées sur les matériaux granulaires et les études sur avalanches de neige réelles.

Le dispositif s'est montré efficace et pertinent pour tester des configurations variées. Son domaine d'emploi privilégié serait sans doute l'étude comparative de la géométrie et de l'implantation des ouvrages un peu à la manière des bassins de carène ou des souffleries. On gardera toutefois à l'esprit l'importance des problèmes de similitude que pose les fluides complexes.

---

[7] Les techniques d'analyse inverse sont décrites au chapitre 5.

[8] La similitude géométrique n'est pas complète car si dans le dispositif l'avalanche est bien à l'échelle 1:1, les capteurs sont de taille métrique et il y a des interactions spécifiques entre l'avalanche et les capteurs (telles que des dépôts de neige, des zones mortes...) qui sont fonctions de la taille métrique des capteurs. Une similitude parfaite nécessiterait des capteurs à l'échelle des ouvrages réels (galerie paravalanche ou bâtiment), c'est-à-dire des capteurs d'échelle décamétrique.

[9] Le canal d'écoulement et la méthodologie mise au point sont décrits dans le chapitre 7.

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

2.3.3. Simulations numériques

Du point de vue des simulations numériques, trois domaines ont été explorés :

– la modélisation numérique des avalanches, plus particulièrement à l'interface entre écoulement et structure ;

– l'étude de la vulnérabilité mécanique des ouvrages paravalanches ;

– la modélisation des structures en maçonnerie exposées à l'impact d'une avalanche.

Le premier domaine, la modélisation numérique des avalanches, s'est préoccupé plus particulièrement de l'interaction entre un écoulement granulaire et un obstacle[10]. Pour cela, deux méthodes ont été testées, la Méthode des Éléments Discrets (MED) et la méthode Smooth Particle Hydrodynamics (SPH). Ces deux méthodes ont prouvé leur capacité à répondre au problème de la simulation d'un écoulement gravitaire granulaire simplifié. Elles constituent sans doute des outils prometteurs mais à l'heure actuelle, on peut considérer qu'elles sont encore au stade exploratoire, ce qui exclut une utilisation en tant qu'outils prédictifs éprouvés.

Le deuxième domaine, l'étude de la vulnérabilité mécanique des ouvrages paravalanches, a consisté à recalculer une galerie d'avalanche récemment construite, la galerie Montaulever sur la route de Val Thorens, en utilisant un modèle simplifié multifibre des éléments horizontaux et un modèle tridimensionnel aux éléments finis d'un poteau vertical. L'objectif était de permettre une comparaison des performances de la structure vis-à-vis d'une part de la réglementation, et d'autre part d'un chargement réel dynamique avalancheux. Les calculs réalisés donnent des éléments de comparaison intéressants que l'on commentera par la suite[11].

Le troisième domaine – la modélisation des structures en maçonnerie composées de petits éléments et exposées à l'impact d'une avalanche – a permis de mettre en place un outil numérique (3DEC), basé sur la méthode des éléments distincts. L'outil mis au point peut être considéré comme quasi opérationnel. En effet pour un temps de calcul raisonnable, il permet d'obtenir dans le détail le comportement et la résistance d'une façade impactée par une avalanche, et ce pour diverses géométries, dimensions, profils de pression, etc. Pour devenir pleinement opérationnel et facilement exploitable, il mériterait quelques développements en termes d'ergonomie et un ajustement de certains paramètres (par comparaison des résultats numériques avec des résultats expérimentaux)[12].

---

[10] La simulation numérique de l'interaction entre un écoulement granulaire et un obstacle fait l'objet du chapitre 8.

[11] La vulnérabilité mécanique des ouvrages paravalanches est traitée chapitre 9.

[12] La vulnérabilité physique des ouvrages en maçonnerie fait l'objet du chapitre 10.

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

2.4. Les apports d'OPALE pour un constructeur

Nous avons vu que le projet OPALE a permis, en croisant des approches expérimentales en situation réelle, des approches de laboratoire et des simulations numériques, de fournir de nombreux résultats. Pour que ces résultats puissent être utiles à la construction des ouvrages, il importe peut-être de les synthétiser, non pas avec l'œil précis du chercheur, mais avec le souci pragmatique du constructeur.

2.4.1. Ordres de grandeur

Le premier élément notable que l'on peut signaler, c'est que les ordres de grandeur dont les constructeurs disposaient pour les avalanches ne sont pas bouleversés. Certes suivant les événements il y a beaucoup de variabilité dans les valeurs, mais les résultats restent dans les fourchettes couramment utilisées.

2.4.1.1 Masse volumique

Les masses volumiques indiquées pour les différents événements enregistrés s'étalent de :

– 80 à 160 kg/m^3 pour la zone de départ ;

– 220 à 340 kg/m^3 pour la zone de dépôt sur la plaque galerie ;

– 260 à 340 kg/m^3 pour la zone d'arrêt.

D'une manière usuelle, on prend en général une valeur de 300 à 450 kg/m^3 pour dimensionner les constructions. Les chiffres obtenus confirmeraient donc la pratique.

Il faut aussi signaler que la masse volumique à l'intérieur de l'écoulement n'est absolument pas connue. De plus, les essais en canal semblent indiquer que cette masse volumique n'est pas constante sur la hauteur de l'écoulement, même en régime permanent uniforme.

2.4.1.2 Vitesse

Les vitesses indiquées pour les différents événements enregistrés ont été comprises entre 13.6 et 30 m/s (49 à 108 km/h), des valeurs qui corroborent les ordres de grandeur connus pour la phase d'écoulement des avalanches.

Il convient de préciser que la vitesse indiquée est la vitesse du front de l'avalanche, la vitesse à l'intérieur de l'écoulement n'étant pas mesurable pour l'instant. Là aussi, les essais en canal et les modélisations numériques semblent indiquer que la vitesse n'est pas constante sur la hauteur de l'écoulement.

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

2.4.1.3 Pression

Les mesures de pression obtenues, par analyse inverse pour le capteur frontal ou par mesure directe pour le capteur tangentiel, sont tout à fait conformes aux ordres de grandeur auxquels sont habitués les praticiens des constructions en zone d'avalanche.

Par exemple pour le capteur frontal, les déclenchements du 15 février 2007 et du 26 mars 2008 ont donné des pressions maxi de 20 à 30 kPa[13].

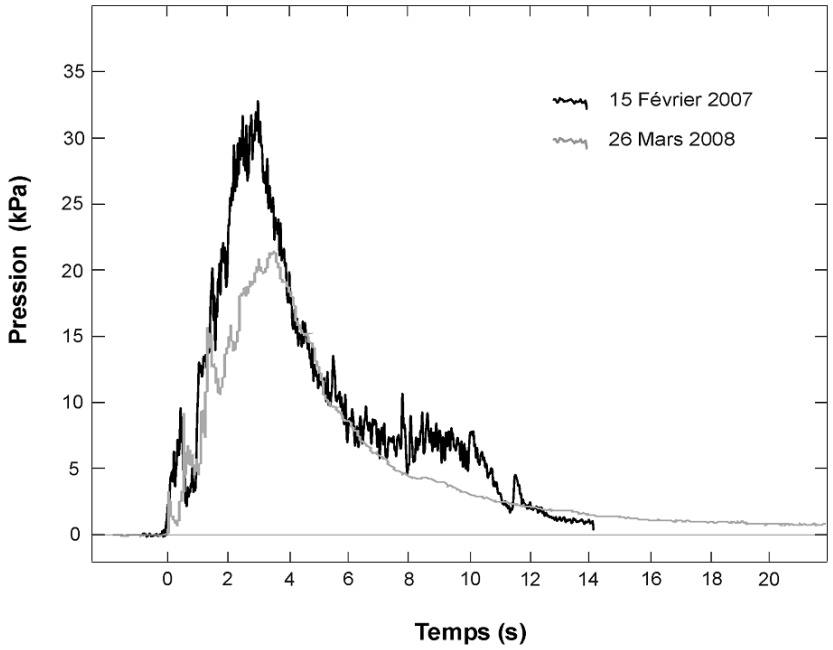

Figure 2. 3 *Pression reconstituée par analyse inverse pour les déclenchements du 15 Février 2007 et 26 mars 2008.*

Pour le capteur tangentiel, l'avalanche du 27 février 2007 a donné des pressions normales maximum de l'ordre de 5 à 10 kPa. Sachant que l'angle α de déviation du capteur par rapport à l'écoulement était de 35°, si on applique un coefficient

[13] On peut rapprocher ces valeurs des mesures obtenues sur le même site en 2006, mais avec des capteurs beaucoup plus petits réalisés avec des méplats en aluminium fixés sur un tripode. Les valeurs maximales obtenues étaient très supérieures à 100 kPa, certaines mesures atteignant 180 kPa. Ce qui confirme que pour mesurer la pression d'une avalanche, la taille du capteur a une influence fondamentale.

correspondant à $1/\sin^2\alpha$ (=3.04 pour 35°) tel qu'on le pratique usuellement pour le calcul des ouvrages, on obtient des valeurs de l'ordre de 10 à 30 kPa.

Pour les deux types de capteur, il faut bien sûr signaler que suivant les événements, il y a une grande variation des maximums mesurés, de l'ordre de 1 à 3 environ, bien que toutes les avalanches aient été des avalanches déclenchées artificiellement dans des conditions à peu près semblables.

Il faut aussi indiquer que quelles que soient les valeurs maximales l'évolution de la pression d'impact est toujours très semblable. En effet, on trouve successivement :

– pendant 2 à 3 secondes, une montée en pression à peu près linéaire jusqu'au maximum ;

– sans palier et pendant environ la même durée que pour la montée, une re-descente jusqu'au tiers ou au quart du maximum ;

– puis un palier quasi stationnaire pendant une certaine durée ;

– et une fin avec une décroissance progressive.

2.4.1.4 Coefficient de frottement

Les mesures de pression normale et tangentielle réalisées avec la « balance à avalanche » ont permis de calculer le rapport p_t/p_n , pression tangentielle sur pression normale, qui devrait être assez proche du coefficient de frottement μ dont on se sert pour justifier les ouvrages.

Dans les faits, ce rapport n'est pas fixe et il varie entre 0,2 et 0,6 tout au long de l'avalanche. On constate d'une manière systématique qu'il a une valeur faible au début de l'avalanche (proche de 0,3) et qu'il passe par un maximum ensuite (environ 0,6). Il est intéressant de noter que ce maximum se situe bien après le pic de pression de l'avalanche.

On peut rapprocher ces valeurs du rapport p_t/p_n (de 0,2 à 0,6) du coefficient μ que l'on utilise pour dimensionner les ouvrages (pour les galeries paravalanches de 0,2 à 0,55, pour les bâtiments de 0,2 à 0,4 en France, de 0,3 à 0,4 en Suisse).

En prenant une valeur constante dans le temps, la pratique constructive sous-estimerait la valeur du coefficient de frottement, et en corollaire les efforts tangentiels à prendre en compte. Mais si on considère que le maximum du rapport p_t/p_n se situe au delà du maximum du pic de pression, on peut estimer que la prise en compte d'un coefficient de frottement μ constant est scientifiquement une approximation très grossière, qui est toutefois largement suffisante en pratique.

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

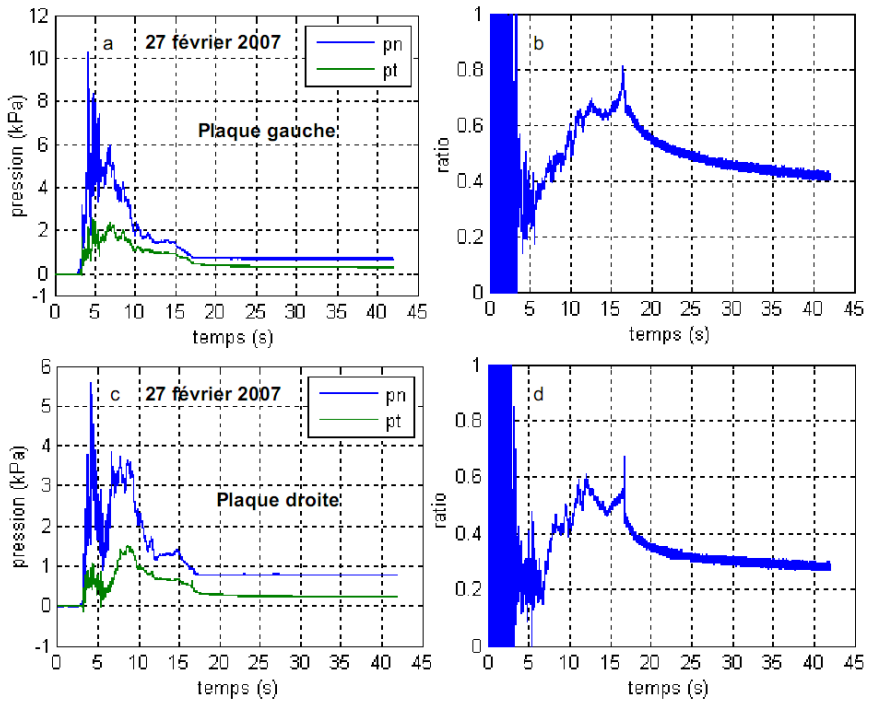

Figure 2. 4 *Pression normale et tangentielle, avalanche du 27 février 2007*

2.4.2. Statique et dynamique

Nous avons vu dans ce qui précède que, pour le dimensionnement des ouvrages dans la plupart des règlements, on prenait en compte la sollicitation avalanche comme une sollicitation statique, en général une pression constante dans le temps et uniforme sur les surfaces affectées.

Nous avons vu aussi que dans le projet OPALE la sollicitation avalancheuse avait été systématiquement considérée et analysée comme une sollicitation variant dans le temps et dans l'espace. Un des grands apports d'OPALE étant justement de donner des indications sur ces variations. À ce sujet on doit signaler que les mesures en avalanche réelle, les simulations expérimentales en modèle réduit et les simulations numériques sont assez convergentes, tout particulièrement en ce qui concerne l'évolution des pressions.

De la sorte, la communauté scientifique considère comme inexact de calculer les ouvrages en statique et recommande des calculs dynamiques. Avant de transmettre

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

aux constructeurs « pragmatiques » cette recommandation, il importe peut être de développer quelques réflexions.

Tout d'abord, il faut signaler que le propos d'un constructeur n'est pas d'avoir une connaissance parfaite de la physique des phénomènes qui vont agresser les structures. Le propos d'un constructeur est de construire un ouvrage qui va résister correctement aux sollicitations qu'il risque de subir pendant toute sa durée de vie, ces sollicitations étant en général imparfaitement connues et approchées sur une base probabiliste.

Dans cet ordre d'idée, on admet très couramment de calculer en statique équivalent des phénomènes qui sont manifestement de l'ordre de la dynamique, par exemple :

– pour le vent, phénomène éminemment dynamique et qui n'est pas sans analogie avec les avalanches, dans presque tous les cas les calculs sont fait sur la base d'une pression statique équivalente avec juste parfois quelques coefficients de majoration dynamique (une analyse plus fine des effets dynamiques est en général réservée aux ouvrages grands et élancés, cheminées ou ponts élevés, pour lesquels des phénomènes de mise en résonance sont à craindre) ;

– pour les calculs au séisme, même si on tient compte de la période propre des ouvrages pour définir l'intensité de la sollicitation, les bâtiments réguliers sont calculés simplement avec des efforts statiques équivalents ;

– pour le choc d'un poids lourd, ou d'une péniche, (un effort qui est pourtant loin d'être statique, c'est à dire « variant infiniment lentement ») on considère une force statique ponctuelle définie forfaitairement.

On réserve en général les calculs dynamiques aux cas suivants :

– la sollicitation est influencée par la réponse de la structure. C'est typiquement le cas du séisme, et en génral des sollicitations vibratoires, où la réponse de la structure va définir l'intensité de la sollicitation. C'est aussi le cas lorsqu'on intègre la raideur ou la souplesse de la structure dans la définition des efforts, ce qui est souvent le cas en matière de choc ;

– il est envisagé que la réponse de la structure soit une réponse dynamique. C'est le cas lorsqu'on prévoit des dispositifs d'amortissement ou d'absorption de choc par déformation. C'est aussi le cas lorsqu'on envisage des mesures de contre–réaction dynamique. On peut à ce sujet penser aux résonateurs à masse accordée que l'on utilise dans les passerelles piétonnes ou dans des tours élevées pour contrecarrer les effets des piétons, du vent ou des séismes.

Si on transpose ces éléments au domaine des avalanches, on peut en tirer quelques leçons, ce que nous ferons dans ce qui suit.

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

2.4.2.1 Vitesse de montée en pression

Tout d'abord, même si la sollicitation avalancheuse n'est pas une sollicitation « variant infiniment lentement », il faut signaler que la montée en pression n'est pas instantanée. En général, il faut quelques secondes (typiquement 2 à 3 s) pour atteindre le maximum. À cette échelle de temps, et pour des ouvrages assez massifs, le matériau a le temps de réagir et de s'adapter et on ne se trouve pas en face de phénomènes de rupture fragile ou d'impact brisant tel qu'on peut les trouver dans les explosions ou les déflagrations[14].

2.4.2.2 Importance des effets dynamiques

Les modélisations réalisées pour la galerie de Montaulever ont fait apparaître, pour les éléments horizontaux calculés avec un modèle multifibre, un coefficient de 1,5 à 1,7 qu'il faudrait appliquer à un chargement statique de pic pour obtenir le même endommagement qu'un chargement dynamique et des oscillations avec une fréquence de l'ordre de 5 Hz (qui correspondaient en fait à la fréquence propre de la structure modélisée, ce qui somme toute n'a rien d'étonnant, mais ne renseigne pas beaucoup sur la sollicitation avalancheuse) .

Pour le poteau amont calculé avec un modèle aux éléments finis, aucune différence significative n'a été obtenue entre un chargement « statique de pic » et un chargement « dynamique réel ».

Il faut aussi rappeler les limitations de ces modélisations.

Tout d'abord ces modélisations n'ont été faites que sur des éléments isolés avec des conditions aux limites simplificatrices. En particulier, ces modélisations ne prennent pas en compte le comportement des sols et des fondations.

Deuxièmement, un seul chargement dynamique a été appliqué, et de surcroît ce chargement était un chargement théorique reconstitué. Il s'agissait en fait d'un chargement avalancheux enregistré sur le site du Lautaret le 14 mars 2006. Ce chargement étant assez faible, il a été fortement amplifié jusqu'à ce que le pic atteigne la valeur de calcul réglementaire.

2.4.2.3 Retour d'expérience

Si on prend en compte le retour d'expérience sur les galeries paravalanches, on peut raisonnablement considérer que dans l'ensemble ces ouvrages ont été calculés

[14] En science des matériaux, on estime qu'il faut une échelle de temps de l'ordre de la milli–seconde pour que les caractéristiques des matériaux varient notablement.

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

et réalisés d'une manière plutôt sécuritaire. En effet, jusqu'à présent, il n'y a pas eu de dommage connu sur ce type d'ouvrage[15].

Pourtant dans l'histoire du génie civil, des ponts se sont effondrés et des barrages ont cédé. Et les leçons tirées de ces sinistres ont permis d'améliorer la sécurité des ouvrages suivants.

En matière de galerie paravalanche, le retour d'expérience n'a amené aucun bouleversement. On peut donc penser que les méthodes de calcul employées sont trop sécuritaires ou que les charges sont trop généreusement évaluées, mais quelle que soit l'hypothèse formulée, les constructeurs ne sont guère enclin à abandonner les méthodes de calcul statique qu'ils emploient.

En matière de bâtiments, on trouve beaucoup plus de constructions endommagées voire détruites par des avalanches, mais la quasi totalité des désordres constatés touchent des constructions pour lesquelles soit le risque était mal pris en compte, soit aucune disposition constructive particulière n'avait été prise.

A contrario, on peut signaler que des constructions, pour lesquelles le risque a été correctement pris en compte, se comporte en général assez bien. Bien sûr ceci suppose une bonne définition de l'avalanche de référence et un dimensionnement correct de la structure. À titre d'illustration, on peut se référer à quelques photographies prises à Lourtier, dans le Canton du Valais en Suisse, le 21 février 1999 où des constructions récemment construites en respectant les prescriptions de la carte de danger et les règles de l'art se sont très bien comportées face à une avalanche de très grande ampleur.

Figure 2. 5 *Lourtier, Canton du Valais en Suisse, avalanche du 21 février 1999 (flèche rouge : construction récente intacte réalisée "conformément aux règles")*

[15] Les seuls ouvrages paravalanches endommagés dont on fasse état sont les dents de Taconnaz. Mais il s'agit là d'un ouvrage très spécifique, avec une hauteur d'avalanche colossale, des chutes de séracs, des impacts de blocs rocheux ...

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

2.4.2.4 Recommandations

Tous ces éléments n'incitent guère pour l'instant les constructeurs à abandonner les méthodes de dimensionnement en statique couramment employées et à passer au calcul des ouvrages paravalanches en mode dynamique.

En effet, d'une part ils ne disposent pas de suffisamment de cas de chargement pertinents à appliquer aux structures, et d'autre part les effets semblent assez ténus : pour un constructeur un ordre de grandeur de 1,5 pour un coefficient d'amplification dynamique n'a rien d'affolant (c'est tout à fait le coefficient de pondération que l'on applique en général sur les charges d'exploitation), surtout quand il faut aller chercher l'endommagement de la structure pour voir apparaître cette amplification (en général, on dimensionne les structures pour ne pas atteindre l'endommagement sous les charges non accidentelles normalement prévisibles).

De surcroît, les méthodes pour modéliser et calculer correctement la totalité d'un ouvrage (y compris l'interface sol-structure) avec un coût et un temps de calcul raisonnables, ne sont pour l'instant pas encore disponibles.

Bien entendu du point de vue de la recherche, il faut poursuivre les études et les modélisations dynamiques, ne serait ce que pour aider les constructeurs à apprécier les marges dont ils peuvent raisonnablement disposer (ou les risques qu'ils pourraient courir sans le savoir).

Dans cette optique, les scientifiques (qui enregistrent et qui calculent), les praticiens spécialistes du danger d'avalanche (qui donnent les valeurs des sollicitations) et les constructeurs (qui dimensionnent les ouvrages) devraient focaliser leur attention sur la problématique du « pic de pression ».

En effet, dans tous les enregistrements obtenus, il est manifeste que ce pic représente environ 2 à 3 fois la pression quasi stationnaire que l'on trouve après. En général, mais bien que cela ne soit pas toujours expressément précisé, les ouvrages sont calculés et dimensionnés pour ce pic de pression et on peut à ce sujet se poser quelques questions.

Tout d'abord, est-ce que l'ouvrage voit vraiment ce pic ? On peut en effet se demander si ce pic n'est pas écrêté par la massivité des ouvrages considérés ou par leurs capacités d'amortissement.

On peut rappeler à ce sujet l'importance du facteur d'échelle rencontré dans les mesures sur les avalanches réelles : au Lautaret, pour les mêmes couloirs et le même type d'avalanches, avec des capteurs constitués de languettes métalliques de quelques centimètres on mesure des pics de pression très supérieurs à 100 kPa ; avec

des capteurs métriques, moyennement massifs, on trouve un ordre de grandeur de pic de 20 à 30 kPa ; que trouverait-on si on faisait des mesures avec des capteurs décamétriques fortement massifs, c'est à dire des ouvrages aussi important qu'une galerie paravalanche[16] ?

D'un autre côté et vu sous l'aspect de la réponse constructive, ne pourrait-on pas envisager des ouvrages, qui par des dispositifs d'amortissement ou de dissipation d'énergie, permettrait d'atténuer ce pic et de diminuer notablement les efforts à prendre en compte[17] ?

2.4.3. Géométrie

Un apport notable d'OPALE est celui de l'importance de la géométrie des ouvrages.

Les expérimentations réalisées en canal avec un matériau granulaire ont mis en évidence des efforts d'impact très importants dès lors que la galerie est proche de la rupture de pente, le pic d'effort pouvant atteindre jusqu'à 10 fois la sollicitation correspondant à une galerie éloignée.

Pour un constructeur, un facteur 10 à prendre en compte est singulièrement contraignant et on voit bien que le dessin et la géométrie des ouvrages peuvent avoir une très grande importance. Dans ce contexte, les outils mis au point dans le cadre du projet OPALE peuvent être des auxiliaires très appréciables : en effet, même si le calage des valeurs absolues par rapport aux avalanches réelles n'est pas encore assuré, les approches expérimentales en laboratoire et les simulations numériques permettent déjà d'étudier différentes configurations géométriques et de donner des valeurs relatives pertinentes[18].

---

[16] A contrario, on devrait aussi s'intéresser aux pics de pression sur des ouvrages très peu massifs, des vitrages ou des volets en bois, tout particulièrement en cas d'aérosol. Mais les avalanches en aérosol sont un domaine que le projet OPALE n'a pas du tout abordé.

[17] Dans le domaine des chutes de bloc, des progrès très significatifs dans le dimensionnement des ouvrages ont été réalisés avec ce type de démarche.

[18] À ce sujet, on pourrait presque dire qu'en matière d'avalanche on commence à disposer d'outils similaires aux bassins de carène, qui ont fondé l'hydrodynamique, ou aux souffleries, qui ont permis l'aérodynamique. De la sorte, on devrait pouvoir commencer à développer une nouvelle discipline la « nivodynamique » en se préoccupant tout particulièrement du dessin, de la géométrie et des facteurs de forme des ouvrages...

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

2.5. OPALE, confirmation, infirmation ou inflexion ?

En conclusion, on peut s'efforcer de répondre à nos trois interrogations d'origine : OPALE, confirmation, infirmation ou inflexion ?

Sur le premier terme « confirmation », OPALE a bien confirmé les ordres de grandeur auxquels les constructeurs étaient habitués : masse volumique, vitesse, pression, coefficient de frottement, sont maintenant mieux connus sur des bases expérimentales en situation réelle correctement mesurées et attestées. OPALE a bien entendu apporté de la finesse et du raffinement, tout particulièrement dans l'évolution des paramètres pendant le déroulement d'une avalanche, mais ce raffinement n'a pas invalidé fondamentalement les valeurs précédemment employées.

Sur le deuxième terme « infirmation », il faudrait en fait employer une négation de négation. En effet, OPALE n'a pas infirmé fondamentalement les méthodes de calcul et de dimensionnement employées par les constructeurs. Certes le caractère dynamique du phénomène avalancheux a été approfondi, mais les résultats apportés par OPALE ne sont pas suffisamment nombreux pour être statistiquement significatifs et pour inciter les constructeurs à adopter d'autres méthodes.

Ces « confirmations » et ces « non-infirmations » sont assez rassurantes pour les constructeurs qui se retrouvent ainsi confortés dans leurs démarches. À la fin d'un projet de recherche important, il est peut être frustrant pour les chercheurs de ne pas avoir totalement bouleversé une question scientifique (et au passage de ne pas avoir offert à la postérité un nom ou un nombre, aussi prestigieux que Reynolds ou que Froude), mais il est très appréciable pour les constructeurs de ne pas voir invalidé tout ce que dans le passé ils ont pu construire[19].

Le dernier terme, « inflexion », est sans doute le plus pertinent pour caractériser les leçons qu'un constructeur pourrait tirer du projet OPALE.

Inflexion, pour bien appréhender la nature de la sollicitation avalancheuse.

Inflexion pour bien tirer parti (ou pour bien se méfier), de l'influence de la géométrie sur les efforts à prendre en compte.

---

[19] Dans d'autres domaines, il n'en n'est pas toujours ainsi. Par exemple en matière de génie parasismique, jusqu'à la fin du XX° siècle, chaque nouveau séisme important conduisait à une refonte complète des codes de calcul et des valeurs de références. De la sorte après chaque séisme les ouvrages construits avec des codes antérieurs devaient être complètement réévalués, souvent confortés (ce qui était presque toujours le cas pour les ponts réévalués) et même parfois totalement reconstruits (ce qui était souvent le cas pour des ouvrages soumis à des contraintes de sûreté).

Inflexion enfin pour envisager des ouvrages qui pourraient minimiser les efforts en atténuant les phénomènes de pic.

Inflexion, mais aussi perspectives qu'un constructeur aimerait voir se développer :

– dans le domaine de l'expérimentation en situation réelle, la multiplication des enregistrements, sur la base de la méthodologie mise au point dans le cadre du projet OPALE, pour obtenir une base de données statistiquement représentatives ;

– toujours dans le domaine de l'expérimentation en situation réelle, des mesures en « vraie grandeur » avec des capteurs représentatifs de l'échelle des ouvrages réels ou une instrumentation d'ouvrages existants ;

– toujours dans le domaine de l'expérimentation en situation réelle, des mesures en « vraie grandeur » touchant des ouvrages peu massifs (vitrages, menuiseries, volets) tout particulièrement avec des avalanches en aérosol ;

– dans le domaine des simulations en laboratoire, l'exploitation des potentialités des expérimentations en canal, pour réaliser l'investigation la plus complète possible des formes et des géométries envisageables, et bâtir ce qu'on pourrait appeler la « nivodynamique », en restant toutefois conscient des problèmes de similitude que posent quasiment tous les fluides géophysiques ;

– dans le domaine de la modélisation des structures en maçonnerie de petits éléments soumises à une sollicitation avalancheuse, la finalisation de l'outil élaboré lors du projet pour le rendre pleinement opérationnel ;

– dans le domaine du calcul des ouvrages paravalanches, l'approfondissement des modélisations pour bien appréhender sous tous ses aspects la problématique de la dynamique des ouvrages ;

– dans le domaine de la simulation numérique des avalanches, la poursuite des démarches engagées qui semblent prometteuses, mais encore très loin des applications pratiques[20] .

[20] À ce sujet, on peut signaler que dans un autre domaine, celui de la météorologie qui est devenue opérationnel et qui utilise aussi beaucoup de simulations numériques, les bases théoriques des modèles utilisés maintenant ont été établies dans les années trente. Mais à l'époque, on se gaussait de ces modèles car on estimait qu'il faudrait faire travailler des centaines de mathématiciens pendant quelques années pour obtenir une journée de prévision valable...

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011

2.6. Bibliographie

[EGL 05] EGLI T., *Recommandations-Protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels*, Berne, Suisse, Association des établissements cantonaux d'assurance incendie AEAI, 2005.

[GIV 04] GIVRY M., PERFETTINI P., *Construire en montagne – la prise en compte du risque d'avalanche*, Grenoble, France, Cemagref, Ministère de l'Ecologie, Ministère de l'Equipement, 2004.

[OFR 07] SCHULER W., FREY R., GALL R., JACQUEMOUD J., LANG T., MARGRETH S., *Directive-Actions d'avalanches sur les galeries de protection* , Berne (Suisse), Office fédéral des routes OFROU, 2007.

hal-00622534, version 1 - 12 Sep 2011