Programme OPALE

Composition du document :

Mémoire et Annexe

Synthèse

Résumés consolidés (Français / Anglais)

Données factuelles

Coordination :

Cemagref – Unité de Recherche ETNA François NICOT Francois.nicot@cemagref.fr

Programme OPALE

Décembre 2005 – Décembre 2008

Rapport final

Mémoire

Coordination :

Cemagref – Unité de Recherche ETNA François NICOT 04 76 76 27 70 francois.nicot@cemagref.fr

Rapport achevé le 18 janvier 2009

A. Rappel des tâches et livrables du projet

	Leader	Participants	Délivrables	Automne- Hiver Année 1	Printemps- été Année 2
Tâche 1 : Développement de l'expérimentation	LOCIE (P. PERROTIN)				
 1.1 Développement des moyens de caractérisation d'avalanches Conception et mise en œuvre des capteurs de vitesse, de pression, et de densité 	Cemagref	INSA, CETE- LRPC	Travail de recherche donnant lieu à publication Dispositif de mesure Mode opératoire	Vitesses	s, pression
1.2 Conception des macro-capteurs de mesure d'efforts tangentiels et normaux	LOCIE	INSA, LOCIE, CETE-LRPC, Cemagref	Cahier des charges	\longleftrightarrow	
1.3 Réalisation des macro-capteurs, et mise en place	Cemagref	INSA, LOCIE, CETE-LRPC	Rapport d'installation		\longleftrightarrow
1.4 Développement en laboratoire du capteur (développement d'un banc d'essai dynamique)	INSA	LOCIE, Cemagref	Rapports : caractéristiques du banc, instrumentation et acquisition		

Tâche 2 : Expérimentation in situ	Leader	Participants	Délivrables	Automne- Hiver Année 1	Printemps- été Année 2
Tâche 2.1 : Expérimentation « Col du Lautaret »	Cemagref (M. THIBERT)				
2.1.1 Déclenchement artificiel et caractérisation des paramètres nivologiques	Compared	INSA, LOCIE,	Rapport d'avalanche :		
2.1.2 Bilan et analyse d'un événement avalancheux (description, images, paramètres de l'écoulement)	Cemagrei	CETE-LRPC	numériques		
2.1.3 Caractérisation topographique initiale (MNT)	LOCIE	Cemagref	Modèle numérique de terrain		\longleftrightarrow
2.1.4 Caractérisation topographique du manteau neigeux	LOCIE	Cemagref	Modèle numérique de la surface du manteau	\longleftrightarrow	
2.1.5 Contrôle et reconfiguration des expériences	INSA	LOCIE, Cemagref			
2.1.6 Bilan et analyse du comportement de la structure (extraction et mise en forme des résultats)	LOCIE	INSA	Rapport par essai : analyse de la sollicitation		

	Leader	Participants	Délivrables	Automne- Hiver Année 1	Printemps- été Année 2
Tâche 2.2 : Expérimentation « La Sionne »	SLF (P. BARTELT)				
2.2.1 Déclenchement artificiel et caractérisation des paramètres nivologiques	SI F	Cemagref,	Rapport d'avalanche :	← →	
2.2.2 Bilan et analyse d'un événement avalancheux (description, images, paramètres de l'écoulement)	SLI	LRPC	numériques		
2.2.3 Contrôle et reconfiguration des expériences	Cemagref	INSA, CETE- LRPC			
2.2.4 Bilan et analyse du comportement des structures (avec chercheur en stage post-doctoral) (Extraction et mise en forme des résultats)	INSA	LOCIE, Cemagref	Rapport par essai : analyse de la sollicitation		

Tâche 3 : Caractérisation et modélisation de l'écoulement	Leader	Participants	Délivrables	Automne- Hiver Année 1	Printemps- été Année 2
Tâche 3.1 : Caractérisation des paramètres de l'avalanche	Cemagref (M. THIBERT)				
3.1.1 Caractérisation globale	Cemagref	LOCIE, INSA	Rapport d'avalanche comprenant : Conditions d'écoulement, hauteur de passage, rugosité, <i>etc.</i>	\longleftrightarrow	
3.1.2 Caractérisation « avancée », en lien avec tâche 1.1	Cemagref	LOCIE, INSA	Profils temporels de vitesses, pression		

Tâche 3.2 : Analyse de l'interaction écoulement / ouvrages Approche expérimentale Sollicitation tangentielle	Cemagref (M. THIBERT)				
3.2.1 Bilan des méthodes d'estimation de l'action tangentielle de l'avalanche sur les ouvrages	LOCIE	INSA, Cemagref, Tonello IC CETE-LRPC	Synthèse des méthodes existantes Résultats des mesures	<	
3.2.2 Analyse inverse	INSA	LOCIE, Cemagref, CETE-LRPC	Profils d'efforts exercés sur la structure		└ ←──→

Tâche 3.3 : Analyse de l'interaction écoulement / ouvrages – Approche expérimentale Sollicitation normale	INSA (A. LIMAM)				
3.3.1 Qualification de la démarche d'analyse inverse	INSA	CETE-LRPC,	Processus de détermination des la distribution de		
	INDA	Cemagref	contraintes normales appliquées à un obstacle		
3.3.2 Constitution d'une base de données expérimentales <i>in situ</i>	Cemagref	CETE-LRPC, INSA	Base de données expérimentales renseignant sur la sollicitation avalancheuse appliquée à un obstacle		

Tâche 3.4 : Analyse de l'interaction écoulement / ouvrages – Modélisation numérique	Cemagref (D. LAIGLE)			
3.4.1 Mise en place de la démarche de calcul – Développement du modèle SPH	Cemagref	LOCIE	Modèle de simulation 2D-V (vertical) SPH	
3.4.2 Modélisation de l'avalanche à l'échelle locale (champ proche, méthode SPH)	Cemagref	LOCIE	Modèle d'action de l'avalanche su l'ouvrage	

Tâche 3.5 : Campagne d'expérimentation en canal	LOCIE (P. PERROTIN)	L3S, Cemagref, INSA	Rapport		
---	------------------------	------------------------	---------	--	--

Tâche 4 : Modélisation du comportement des structures	L3S (D. DAUDON)			
4.1 Modélisation EF « avancée »	L3S	INSA, LOCIE, CETE-LRPC, Cemagref	Etude de sensibilité du dimensionnement aux hypothèses d'estimation des efforts. Protocole de modélisation	<
4.2 Validation de l'approche par comparaison avec mesures en laboratoire et de terrain	L38	INSA, LOCIE, CETE-LRPC, Cemagref	Analyse avec modèle, rapport de modélisation	

Tâche 5 : Valorisation	Leader	Participants	Délivrables	Automne- Hiver Année 1	Printemps- été Année 2
Tâche 5.1 : Valorisation (galeries paravalanches)	LOCIE (P. PERROTIN)				
5.1.1 Synthèse des méthodes actuelles de dimensionnement des galeries paravalanches	LOCIE	INSA, Cemagref, Tonello IC	Document de synthèse	\longleftrightarrow	
5.1.2 Bilan des campagnes expérimentales	Cemagref	SLF, LOCIE, INSA	Compte-rendu d'essais sur CD		\longleftrightarrow
5.1.3 Diffusion des résultats	LOCIE	INSA, Cemagref, L3S, Tonello IN, CETE-LRPC	Organisation d'une journée de restitution avec la Profession		
5.1.4 Profil de sollicitation d'une avalanche	Cemagref	LOCIE, INSA, CETE-LRPC	Recommandations de profils		
5.1.5 Vers une amélioration des méthodes de conception Développement d'une approche de calcul simplifiée Validation par comparaison avec calculs EF « avancés »	LOCIE	SLF, L3S, INSA, CETE-LRPC, Tonello IC, Cemagref	Outil de calcul simplifié Rédaction de recommandation		~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~

Tâche 5.2 : Valorisation (murs en maçonnerie)	Cemagref (F. NICOT)				
5.2.1 Définition de profils architecturaux représentatifs	M. Givry	Cemagref	Liste de profils	\longleftrightarrow	
5.2.2 Développement d'un modèle numérique aux éléments discrets	Cemagref	M. Givry	Outil numérique simulant la réponse d'un bâtiment en maçonnerie	<	
 5.2.3 Analyse expérimentale du comportement d'un mur sous chargement hors plan Qualification du procédé de renforcement TFC 	INSA	Freyssinet, Cemagref	Base de données expérimentales Guide d'utilisation du procédé TFC pour renforcement de bâtiments en maçonnerie vis-à-vis des avalanches		<
5.2.4 Simulation numérique, retour d'expérience	Cemagref	M. Givry, CETE-LRPC, INSA, Freyssinet	Outil de qualification de la vulnérabilité physique d'un bâtiment Guide de recommandations architecturales		

B. Synthèse d'activité des différentes tâches

Tâche 1Expérimentation in-situ

<u>D. Baroudi</u>, A. Limam, B. Hugueny, M. Brun, F. Emeriault, URGC, INSA de Lyon <u>E. Thibert</u>, X. Ravanat, UR ETNA, Cemagref Grenoble P. Berthet-Rambaud, CETE Lyon

Objectifs:

- Essais de caractérisation du matériau du poteau du CEMAGREF supportant la plaque sur le site du Lautaret,
- Essais de traction et de choc in-labo à l'INSA,
- Essais de choc à sec, hors période neigeuse : caractérisation des réponses au choc des macrocapteurs installés au col du Lautaret (FR) et à la Sionne (CH),
- Présentation de nouveaux résultats de mesure des efforts normaux par analyse inverse sur la plaque utilisant un modèle plus élaboré.

Essais de caractérisation des macro-capteurs d'avalanches de neige *in-situ* à sec et *in-labo*

Introduction

Des macro-capteurs à une échelle métrique, pour la mesure indirecte des efforts exercés sur les structures par une avalanche de neige, ainsi qu'une méthode inverse ont été développés (thèse de P. Berthet-Rambaud [1] et tâches 2.1, 3.3 et 2.2 du rapport semestriel d'activité n°1, période du 1 janvier au 30 juin 2006). L'estimation des efforts dynamiques exercés sur la structure sont estimés par la méthode inverse en se basant sur les mesures de déformations données par ces macro-capteurs.

La fiabilité de la méthode inverse exige la connaissance des spectres de réponse des macrocapteurs opérationnels *in-situ*. En plus des données liées aux matériaux (essais de caractérisation *in-labo*), une estimation *in-situ* des amortissements est nécessaire. C'est dans ce but que ces essais de choc sur des capteurs installés et opérationnels sur les sites du Lautaret et de La Sionne, ont été réalisés hors période de neige. Idéalement, ces essais devraient être reconduits en période neigeuse pour les structures soumises à la reptation du manteau neigeux.

Essai de caractérisation du matériau du poteau supportant la plaque

Des essais en laboratoire ont étés réalisés au sein du laboratoire l'URGC-Structures de l'INSA de Lyon dans le but de mesurer le module de Young de l'acier du poteau HEB 240 en acier du CEMAGREF supportant la plaque. Deux types d'essais sont conduits sur des éprouvettes tirées des « restes du poteau » : essais de traction et essais de choc (Figure 1). Le module de Young a été estimé à 193.3 GPa basé sur l'essai de traction et à 191.1 GPa basé sur l'essai de choc (Figures 3 et 4). L'essai de choc a aussi été utilisé pour estimer le coefficient

d'amortissement *in-labo* de la « mini-languette » de dimensions $50.06 \times 9.47 \times 2.93 \text{ mm}^3$ (3 éprouvettes prismatiques testées). Naturellement, le coefficient d'amortissement doit être déterminé par des essais *in-situ*, comme lors des essais de choc rapportés dans ce document. Les éprouvettes de traction (Figure 2) ont été instrumentées avec des jauges de déformation ainsi qu'avec une paire d'extensiomètres (2 éprouvettes). Les languettes on été dotées d'une jauge de déformation à 7 mm de l'encastrement.

Les essais de caractérisation des matériaux des fusibles en aluminium et acier inox au Lautaret ainsi que des languettes installées en Suisse ont étés réalisés et rapportés précédemment (Rapport OPALE-ANR, juin 2006).



Figure 1 : Principe des essais de traction et de choc.



Figure 2 : éprouvettes de traction.



Figure 3 : Courbes mesurées lors des essais de traction sur deux éprouvettes.



Figure 4 : Essai de choc (et d'amortissement) : déformations mesurées.

Essais de caractérisation in-situ

Des essais de choc *in-situ* de caractérisation des macro-capteurs installés sont conduits (Figure 5). Ces essais servent à quantifier les réponses en déformation (et en accélération) des différents capteurs ainsi qu'à estimer les amortissements.

Pour une description détaillée des sites et de l'instrumentation, le lecteur pourra se rapporter aux documents antérieurs émis dans le cadre de ce projet (Rapport OPALE-ANR, juin 2006).

LE LAUTARET

Conditions expérimentales

Les essais ont été réalisés le 17 octobre 2006 avec la centrale d'acquisition utilsée lors des opérations de déclenchement, mais dans des conditions d'acquisition adaptées aux essais.

- La fréquence d'acquisition est ici de 30 kHz,
- La bande passante des mesures de déformation (fusibles alu au tripode du couloir n°2, poutre et nouveaux fusibles inox du couloir n°1) est de 0-10 kHz. Le filtre passe bas utilisé est un Butterworth du 4^{ème} ordre dont l'atténuation est de -24dB/octave.
- La bande passante des mesures de force d'impact sur les structures testées, et des mesures d'accélération sur la poutre du couloir n°1 est de 0.2 -10 kHz. Le filtre passe haut est un 2 pôle RC de coupure 0.2 Hz d'atténuation +20dB/decade. Le filtre passe bas est un Butterworth du 4^{ème} ordre dont l'atténuation est de -24dB/octave.

Le capteur de force monté sur le marteau d'impact est un piézoélectrique 1051V5 LIVM de chez Dytran de 500 kg d'étendue de mesure et dont la bande passante est de 15 kHz (figure 5). Il peut être équipé de différents embouts (alu, PVC, néoprène) afin d'obtenir différents spectres d'énergie d'impacts à adapter aux domaines de réponse en fréquence des structures.



Figure 5. Marteau de choc équipé du capteur de force dynamique Dytran

Le tripode



Figure 6 : Principe des essais de choc au tripode.

Lors des essais de choc sur les fusibles du tripode, les déformations données par les jauges des fusibles montrées sur la Figure 6, ont été enregistrées (Figures 7, 8 et 9). Les forces d'impact ont aussi été enregistrées en synchrone. Afin d'avoir une idée sur le spectre de la force transmise à travers l'embout en PVC, un exemple du spectre mesuré de la force d'impact avec cet embout est donné en Figure 10.

Les spectres de déformation pour les fusibles 1 et 2 sont reportés dans le Tableau 1 et dans les Figures 11 et 12.



Figure 7 : déformations mesurées lors de l'essai de choc sur le fusible nol à 1.33m au sol avec un embout en PVC.



Figure 8 : déformations mesurées lors de l'essai de choc sur le fusible no2 à 1.75m au sol avec un embout en PVC.



Figure 9 : déformations mesurées lors de l'essai de choc sur le fusible no2 à 1.75m au sol avec un embout en inox.



Figure 10 : spectre mesuré in-labo de la force d'impact avec un embout en PVC.

	Embout PVC	Embout Inox			
<i>Théorie,</i> poutre de BE avec condition limite (CL)fixe parfaite, encastrement, à un bout et libre à l'autre (console)	155 Hz				
<i>In situ essai</i> : Les CLs ne sont pas exactement les mêmes au bout fixé.	100 Hz, fusible No1 119 Hz, fusible No2	95 Hz, fusible No1 110 Hz, fusible No2			

Tableau 1 : Fréquence propre fondamentale des fusibles.





Figure 11 : spectre mesuré de la déformation des fusibles 1 et 2. Embout en PVC.



Figure 12 : spectre mesuré de la déformation des fusibles 1 et 2. Embout en INOX.

Le système « Poutre avec la plaque »

Des essais de choc ont été conduits sur la poutre avec la plaque montée en positon haute (à 12 cm bord-à-bord haut). Les grandeurs mesurées sont les déformations données par les jauges collées le long de l'axe de flexion de la poutre (Figure 13) ainsi que l'accélération mesurée par l'accéléromètre situé à 1.57 m de l'encastrement de la poutre (Figure 14). Les résultats des mesures sont donnés ci-dessous en terme de première fréquence propre de la poutre en flexion :

- 14 Hz, observée sur les jauges 1, 2, 3 et 4 de déformation sur la poutre (avalanche du 17/10/2006)

- 15 Hz, observée sur l'accéléromètre (avalanche du 17/10/2006)
- 15 Hz, observée sur avalanche 14 mars 2006, accéléromètre
- 10-15 Hz observée sur jauge 1, avalanche du 14 mars 2006
- 16 Hz, théorie des poutres de BE

Les spectres des déformations et des accélérations mesurées sont donnés dans les Figures 14 et 15.



Figure 13: déformations mesurées par les quatre jauges le long de l'axe de flexion de la poutre dans un essai de choc (impact sur la poutre avec masselotte avec embout en PVC).



Figure 14 : accélération mesurée à 1.57m de l'encastrement de la poutre au sol lors d'un essai de choc (impact avec masselotte avec embout en PVC).

Sur les Figures 15 et 16, les réponses modales de la poutre issues des données des jauges et accéléromètre lors de l'avalanche du 14 mars 2006 au Lautaret sont comparées. On constate que le premier mode observé en flexion est entre 13 et 15 Hz pour le pylône supportant la plaque en position haute. On peut donc conclure que le modèle poutre est adéquate pour l'analyse inverse de la poutre supportant la plaque.



Figure 15. Spectres des réponses en déformation observées correspondants au mode de flexion sur les jauges 1-4 du pylône impacté. La théorie des poutres de BE nous donne 16 Hz pour le premier mode de flexion. Les pics modulo 50 Hz correspondraient au réseau électrique d'EDF.



Figure 16 : Spectres des réponses observées en accélération correspondants au mode de flexion. En noir, essai de choc in-situ, à sec sans neige en novembre 2006. En bleu, avalanche du 14 mars. La théorie des poutres de BE nous donne 16 Hz. (remarque : l'accéléromètre actuellement opérationnel est plus sensible que celui utilisé lors de l'avalanche du 14 mars 2006)

Mesure des efforts normaux par analyse inverse sur la plaque

Le but de ce chapitre est de présenter les efforts de pression subis par la plaque (Figure 17) lors de l'avalanche du 14 mars 2006 au Lautaret estimés à l'aide d'un modèle inverse plus avancé.



Figure 17. Schéma de principe du fonctionnement du capteur poutre-écran.

Dans cette analyse inverse de la plaque, le modèle direct développé prend en compte les masses de la plaque et des poutrelles de support (Figure 18). La poutre supportant la plaque est modélisée par une poutre d'Euler-Bernouilli avec une matrice de masse consistante.



Figure 18. Detail des structures composant le capteur poutre écran

Ce modèle rend mieux compte des réponses fréquentielles de la poutre observées lors des essais de choc *in-situ* et lors de l'avalanche même (Figures 14 et 15). En résumé, nous avons mesuré un premier mode de flexion entre 13 et 15 Hz, exhibé sur les Figures 14 et 15, conforme à la valeur théorique de 16 Hz obtenue par notre modèle direct de poutre-écran. Le principe du capteur « poutre-plaque », rappelé en Figure 17, est détaillé dans le rapport de la tâche 2.1 de juin 2006.

Mesure des déformations

Les mesures des déformations se font au dessus du socle d'encastrement à l'aide de jauges de déformation (rapport précédent tâche 2.1)

La petite avalanche déclenchée le 14 mars a permis de solliciter le capteur sans provoquer son appui sur la dent béton et de mesurer les signaux de déformation (figure 19). L'analyse inverse de ce signal permet de reconstituer la sollicitation (figure 20).



Figure 19. Déformation mesurée par la jauge 1 de la poutre.

La pression calculée par méthode inverse (méthode fréquentielle avec filtre de régularisation passe bas utilisant le principe de Morosov) est présentée sur la Figure 20.



Figure 20 : Pressions calculées par analyse inverse à partir des mesures de déformation des jauges $n^{\circ}1et \ 2$ (avalanche du 14 mars 2006). Les barres horizontales correspondent à des pressions calculées avec la formule $\frac{1}{2}\rho v^2$ avec différentes hypothèses sur la densité de la neige sont présentées pour indication.

Proposition d'une procédure de quantification des conditions limites

Le but est de quantifier *in-situ* les conditions limites réalisées après serrage idéal à la fixation (encastrement) des fusibles et languettes ou bien tout autre macro capteur sur son mât de support. Voici la procédure proposée :

- Resserrer la (les) fixation(s) de la plaque languette/fusible ou bien de la macrostructure dans son bloc à fond et "éliminer" les jeux entre ces deux parties
- Resserrer la fixation entre le fusible/languette ou la macrostructure et le mât support jusqu'à stabilisation du spectre de réponse de la structure par rapport au spectre théorique obtenus lors des essais de chocs (rapporter les moments de serrage mesurés par la clef dynamométrique). La procédure de serrage in-situ débute avec la valeur du moment de serrage obtenue en laboratoire qui correspond à l'adéquation des spectres de réponse.
- Au besoin réitérer la procédure : resserrage, essais de choc *in-situ* en temps réel, stabilisation du spectre, rapporter les moments de serrage *versus* fréquences propres observées.

Dans les cas où la procédure proposée ne pourrait pas être réalisée, il faudrait alors au moins quantifier les réponses fréquentielles réalisées pour les différents macro-capteurs installés et opérationnels *in-situ*. Ou bien au pire, avoir des observations ou des estimations sur les dispersions observées pour ces variables.

LA SIONNE

Conditions expérimentales

Les essais ont été réalisés le 24 octobre 2006 à l'occasion du montage des fusiles inox sur le pylône. La centrale d'acquisition n'est pas celle utilisée lors des opérations de déclenchement (dont la fréquence d'acquisition est configurée 2 kHz, bande passante de 0-600Hz), mais une centrale portative offrant les conditions d'acquisition adaptées aux essais.

- Une fréquence d'acquisition de 30 kHz,
- La bande passante des mesures de déformation (fusibles alu au tripode du couloir n°2, poutre et nouveaux fusibles inox du couloir n°1) est de 0-10 kHz. Le filtre passe bas utilisé est un Butterworth du 4^{ème} ordre dont l'atténuation est de -24dB/octave.
- La bande passante des mesures de force d'impact sur les structures testées, et des mesures d'accélération sur la poutre du couloir n°1 est de 0.2 -10 kHz. Le filtre passe haut est un 2 pôle RC de coupure 0.2 Hz d'atténuation +20dB/decade. Le filtre passe bas est un Butterworth du 4^{ème} ordre dont l'atténuation est de -24dB/octave.

Le capteur de force monté sur le marteau d'impact est un piézoélectrique 1051V5 LIVM de chez Dytran de 500 kg d'étendue de mesure et dont la bande passante est de 15 kHz. Il peut être équipé de différents embouts (alu, PVC, néoprène ; Figure 20) afin d'obtenir différents spectres d'énergie d'impacts à adapter aux domaines de réponse en fréquence des structures.



Figure 20. La centrale d'acquisition et le marteau de choc utilisé lors des essais. Le point impacté sur le fusible est indiqué.

Essais

Des essais d'impact ont été réalisés sur le fusible inox n°1 (S150) situé à 1.5 m de hauteur sur le pylône. Les réponses en déformation mesurées par la jauge de la languette 1 sont données sur les Figures 17, 18 et 19. L'épaisseur du fusible est égale à 30 mm ; les jauges sont situées à 25 mm de l'encastrement. Le choc est réalisé avec trois types d'embout : inox, PVC et néoprène. Les réponses fréquentielles sont présentées sur les Figures 21 et 22.



Figure 16 : principe de l'essai de choc in-situ.



Figure 17 : déformations mesurées par la jauge de la languette 1 (figure 20) dans l'essai de choc insitu. Embout en PVC.



Figure 18 : déformations mesurées par la jauge de la languette 1 (figure 16) dans l'essai de choc insitu. Embout en néoprène.



Figure 19 : déformations mesurées par la jauge de la languette 1 (figure 16) dans l'essai de choc insitu. Embout en aluminium.



Figure 20. Spectres des réponses en déformation observés correspondants au premier mode de flexion sur la jauge de la languette impactée. Les pics modulo 50 Hz correspondraient aux parasites électriques du réseau EDF.



Figure 21. Spectres des réponses en déformation observés correspondants au premier mode de flexion sur la jauge de la languette impactée. Les pics modulo 50 Hz correspondraient aux parasites électriques du réseau EDF.

Les fréquences mesurées dans le spectre des déformations sont supérieures à celles identifiées par les 3 modèles à disposition :

DKT = 254.4 Hz (plaque mince libre de longueur 250 mm) DST (S=Shear) = 248.1 (plaque avec prise en compte des déformations de cisaillement, L = 250 mm) Poutre BE (L = 250mm : 361 Hz et "251" Hz pour L = 300 mm)

Bibliographie

[1] Berthet-Rambaud P., *PhD-thesis. Grenoble UJF*.

Tâche 2Mesure des efforts normaux par analyse inverse
Expérimentation au Lautaret
Estimation de l'erreur de mesure

<u>E. Thibert</u>, X. Ravanat, UR ETNA Cemagref Grenoble A. Limam, D. Baroudi, INSA Lyon P. Berthet-Rambaud, CETE-Lyon

Objectif : Estimation des erreurs dans la détermination de la pression reconstruite par analyse inverse

La mesure de pression est réalisée à l'aide du capteur macroscopique intégrant tous les efforts normaux auquel peut être exposé un ouvrage réel de taille métrique.

Rappel du principe métrologique.

Le principe de ces capteurs est de quantifier les efforts exercés par une avalanche sur une structure à l'aide de plusieurs mesures de déformation et d'accélération. L'ensemble de la structure constitue un corps d'épreuve qui se présente sous la forme d'une plaque écran de 1 m^2 en position normale à l'écoulement et supportée par une poutre console en acier, fixée et instrumentée en pied à l'aide de jauge de déformation (figure 1). La sollicitation est déterminée par des méthodes d'analyse inverse.



Figure 1. Schéma de principe du fonctionnement du capteur poutre-écran.

Nous avons effectué une estimation de l'erreur de quantification de la pression par la méthode d'analyse inverse. Pour ceci, nous avons utilisé les résultats du tir du 15 février 2007 (photographie 1). La pression reconstruite par analyse inverse est indiquée à la figure 2.



Figure 2. Pression reconstruite par analyse inverse pour le tir du 15 février 2007.

Analyse inverse

Les calculs sont réalisés à l'aide de la fonction de transfert issue du modèle d'Euler-Bernoulli en supposant un premier mode de flexion à 20 Hz. La figure 3 indique la fonction de transfert en fréquence $h(\omega)$. Le 1^{er} mode propre de flexion simple dans le sens de l'avalanche tel qu'il est donné par l'analyse éléments finis est en très bonne concordance (Figure 4). Les données utilisées pour reconstruire la pression sont les déformations mesurées *in-situ* lors de l'avalanche à l'aide des jauges de déformation n°1 et 2. (Figure 5). La déformation résiduelle est due à la charge statique de neige déposée sur la structure.

La technique de régularisation utilisée consiste à appliquer un filtre passe-bas, $\Phi(\omega)$, à la fonction de transfert afin de couper les instabilités présentes dans le signal de pression reconstitué, $f(\omega)$.

$$\hat{f}_{\delta}(\omega) = \frac{\hat{\varepsilon}_{\delta}(\omega) \cdot \hat{\phi}(\omega)}{\hat{h}(\omega)}$$

On a utilisé le principe de discrimination de Morosov pour déterminer la fréquence de coupure du filtre Φ . La fréquence optimale de régularisation (ici 25 Hz) est obtenue lorsque la différence entre la déformation mesurée *in-situ*, ε_m , et celle recalculée, ε_c , à partir du modèle direct (poutre d'Euler-Bernoulli) et de la pression reconstituée ($\varepsilon_c(\omega)=f(\omega)*h(\omega)$) est inférieure à l'incertitude de mesure des déformations, δ , (soit $|\varepsilon_m-\varepsilon_c|<\delta=3.10^{-6}$ m/m, Figure 6).



Photographie n°1. Tir du 15 février (ici au couloir n°2).



Figure n°3. Fréquence de réponse en fréquence, $H(\omega)$, utilisée pour le calcul de la pression lors du tir du 15 février 2007.



Figure $n^{\circ}4$. Modes propres en flexion axiale dans la direction de l'avalanche.



Figure n°5. Déformation mesurée à la jauge n°1 lors de l'avalanche du 15 février 2007.



Figure n°6. Détermination du filtre optimal de régularisation (principe de Morosov). Le point d'inflexion indique la fréquence optimale (ici 25 Hz).

Analyse d'erreur

L'estimation de l'erreur dans la pression reconstituée est conduite à l'aide d'une analyse de Monte Carlo portant sur les principaux paramètres intervenant dans la fonction de transfert utilisée, c'est à dire dans le modèle direct. La première étape consiste donc à effectuer une analyse de sensibilité pour identifier les paramètres les plus importants. Les douze paramètres identifiés et caractérisés chacun par une fonction de distribution (N : loi normale avec un écart type, U : distribution uniforme entre un min. et un max.) sont indiqués au tableau 1.

Rank	Xj	mean	min	max	std	0xj/(xj,0)	obs
1. fixation	$BC \rightarrow U[min, max]$	1.00	0.95	1.05		5%	Djebar
2. posit.plaque	$L0 \rightarrow U[min, max]$	1.47	14.6	1.48	0.006	0.01/1.47	Manu
3. Module Young	E -> N(210, 12)						2 essais de traction 209.664e9 et 176.954e9
4. Moment enertie section	I_beam →U[min, max]	11260e-8				0.25mm / dim. Section Env. +-2%	Tol. Acier Djebar
5. Long. poutre	L_beam →U[min, max]	3.50	3.49	3.51	0.006	0.01/3.50	Manu
6. masse tot. palque	m_plate →U[min, max]	190	180.	200.	5.75	10/190	Manu
7. densité poutre	rho →U[min, max]	7850				+-2.5%	Dj ← steel tol 1/4mm
8. section poutre	A_beam →U[min, max] Surface de la section du profilé HE 240 B	106e-4				0.25mm / dim. Section Env. +-1.7 % arrond. +-2%	
	m_beam=rho*A_beam (kg/m) laisse ces paramètres libres						+(-)0.1 kg/m, catalogue de profilé métallique : ARBED (masse linéique à +-100g/m)
9. damping coef. Mater. Et structure	psi (structural+mat.damping) →U[min, max]	0.0033	0.0032	0.0034		+-2% estimé	Djebar
10. posit. Strain gage	xi (strain gage position) →U[min, max] (mm)	200	198	202	0.001 2	+-1mm de position in- situ	Bruno
11. hauteur de la section 240mm	h U[min, max] (mm)	240	239.75	240.25		+-0.25mm/240mm	HE 240 B, Djebar
12. masse de la neige "collée" à la plaque	Neige collée sur la plaque	N(120, 10) kg					Manu

Tableau 1. Paramètres identifiés dans l'analyse de sensibilité de la fonction de transfert.

L'influence de ces paramètres sur la fonction de transfert est présentée à la figure 7. Le paramètre le plus critique est la condition d'encastrement de la structure. Ce paramètre explique seul 63% de la variance totale de l'ensemble des douze paramètres identifiés. Le second paramètre est la position de la plaque sur la poutre (23% de la variance). Viennent ensuite le module d'Young (4%), le moment d'inertie de la poutre (3.9% du aux tolérances des cotes de la section HEB), et les longueurs de la poutre et la masse de la plaque (2 et 2%). La seconde étape consiste à effectuer une simulation de type Monte Carlo en réalisant un échantillonnage (N=500) des paramètres selon les fonctions de distribution choisies et à calculer les différentes fonctions de transfert associées. La figure 8 illustre les 500 fonctions de transfert obtenues : le premier mode moyen est observé à 20,98 \pm 0,94 Hz. Enfin, les calculs d'analyse inverse ont été réalisés avec la famille des 500 fonctions de transfert pour reconstituer les pressions générées sur la structure. La figure 9 illustre la pression moyenne obtenue en fonction du temps et les pressions à \pm 3 écarts types. On peut ainsi estimer que la pression maximum à l'impact de l'avalanche est déterminée à \pm 4 kPa soit environ 10 % d'erreur relative.



Figure n°7. Influence des 8 paramètres les plus sensibles sur la fonction de transfert en fréquence, exprimée en % de la variance totale.



Figure n°8. Famille des 500 fonctions de transfert obtenues à partir de la simulation de Monte Carlo. La fréquence propre moyenne est de 20,98 ±0,94 Hz.



Figure n°9. Pression moyenne reconstituée par analyse inverse (en noir) et pressions correspondant à \pm 3 écarts types de la distribution obtenue (en gris). La pression maximum à l'impact de l'avalanche est estimée à 43 kPa \pm (σ =4 kPa).

Tâche 3.4 Analyse de l'interaction écoulement / ouvrages – Modélisation numérique

Tâche 3.4.1Mise en place de la démarche de calcul – Développement du modèle SPHTâche 3.4.2Modélisation de l'avalanche à l'échelle locale (champ proche, méthode SPH)

Responsable : Cemagref – ETNA (D. Laigle, R. Bouvarel) Collaboration : LOCIE

Travaux développés à ce jour au Cemagref

SPH est une méthode particulaire lagrangienne de résolution des équations de la mécanique des fluides, typiquement, des équations de type Navier-Stokes. Elle ne considère donc pas des particules physiques en interaction (collisions, frottements...) mais des particules virtuelles sans dimension qui interagissent entre elles par l'intermédiaire d'une loi de comportement fluide, typiquement, une loi visqueuse. L'usage de particules permet en définitive un maillage du domaine de calcul, comme dans les méthodes numériques plus classiques de type volumes-finis, avec cependant l'avantage que ce maillage s'adapte très directement à l'écoulement du fluide considéré. Cette méthode permet de surcroit un calcul aisé de la position de la surface libre de l'écoulement, ce qui dans le domaine des écoulements naturels tels que les avalanches, constitue un avantage important.

Au cours de sa thèse réalisée au cemagref, Philippe Lachamp (Lachamp, 2003) a développé un code SPH dédié à l'étude des interactions entre écoulements à surfaces libres de fluides complexes et des obstacles. Il a dans ce cadre abordé un certain nombre de problèmes liés à l'application de la méthode, tels que le traitement des conditions de paroi. Le code existant est bidimensionnel vertical. C'est un modèle de type champ proche dont l'échelle d'utilisation est le voisinage immédiat de l'obstacle. Il a fait preuve de sa robustesse lors de tests portant sur des écoulements simples en régime permanent (couette, poiseuille...) ou sur des écoulements à surface libre en régime transitoire de type rupture de barrage instantanée, en l'absence d'obstacle. Il a également permis d'obtenir des résultats théoriques très intéressants concernant l'interaction d'écoulements transitoires à surface libre de fluides viscoplastiques avec des obstacles, notamment des profils temporels d'évolution de la pression en divers points du parement amont d'une structure soumise à l'impact du fluide. Ces résultats théoriques n'ont toutefois pas encore été validés par confrontation à l'expérience. L'un des enjeux majeurs du projet OPALE va consister, pour ce qui concerne les avalanches, à opérer cette confrontation entre approche numérique SPH et écoulements avalancheux en conditions de laboratoire ou in situ. Le code SPH du Cemagref a fait l'objet en 2006 d'un travail de restructuration, de test et d'interfaçage, visant à le rendre plus modulaire, plus fiable et accessible à un plus grand nombre d'utilisateurs et de domaines d'application. Ce travail a été mené par Sabahattin Dizdar, étudiant en Master professionnel Modélisation et Simulation en Mécanique de l'université Joseph Fourier et stagiaire au Cemagref de début avril à fin septembre 2006. Ce travail n'a permis d'aborder la problématique des écoulements granulaires que de façon très partielle, c'est pourquoi nous avons recruté en 2007 Romain Bouvarel un autre étudiant du Master professionnel Modélisation et Simulation en Mécanique de l'université Joseph Fourier qui effectue son stage de début avril à fin septembre 2007. Parmi les objectifs de ce stage, nous avons retenu la préparation d'un certain nombre de simulations permettant de représenter numériquement des expériences de laboratoire en cours, parmi lesquelles, les expériences actuellement menées au LOCIE sur l'interaction d'avalanches avec des galeries de protection routières.

Contexte et objectifs

La méthode Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) est une méthode particulaire apparue à la fin des années 1970. Elle permet de calculer des écoulements fluides de toutes sortes, et s'avère dans la plupart des cas bien plus précise que les méthodes classiques de type Volumes Finis. En effet, elle n'utilise pas d'approximation de champ moyen (de Saint-Venant), et traite directement les équations de la mécanique des fluides. Cela permet une représentation naturelle de la surface libre et du champ de pression interne. L'un de ses avantages majeurs est aussi la prise en compte directe de la loi de comportement fluide au travers d'une viscosité apparente, ce qui permet d'aborder des fluides complexes avec une relative simplicité.

Cette méthode est donc tout à fait adaptée à notre objectif, qui est la simulation d'écoulements sur obstacle. Ce problème trouve application dans les aménagements de zones à risques en montagnes, avec les digues paravalanches par exemple, ou encore les ouvrages de protection contre les laves torrentielles. La modélisation SPH de ce type d'écoulements est un avantage double pour le dimensionnement des structures protectrices, nous donnant accès à une répartition spatio-temporelle de la pression exercée par le fluide sur l'obstacle, mais aussi aux caractéristiques de l'écoulement perturbé par l'obstacle.

La neige est un fluide complexe, du fait de la diversité morphologique des cristaux et de leur évolution temporelle, qui peuvent donner lieu à des phénomènes variés. Pour représenter au mieux les écoulements en question, plusieurs lois de comportement sont à notre disposition. De nombreuses études ont été menées sur le modèle de Herschel-Bulkley, implémenté dans notre code SPH depuis plusieurs années. Ce modèle est en général utilisé pour représenter des laves torrentielles. Cependant, bon nombre de chercheurs travaillant sur des approches expérimentales de phénomènes gravitaires naturels utilisent des matériaux granulaires. Il semblerait que la neige se comporte de manière similaire lors de certaines coulées. Seulement, les modèles rhéologiques granulaires existants sont assez sommaires, et de fait peu représentatifs des écoulements réels.

En 2006, Jop, Forterre et Pouliquen ont établi un modèle rhéologique d'écoulement granulaire, basé sur des expériences, à priori beaucoup plus complet que les modèles existants. En effet, il prend en compte l'existence d'un régime permanent, ce qu'aucun modèle ne faisait jusqu'alors. Cette loi de comportement est tout de même encore peu validée.

Nous avons choisi d'implémenter cette loi dans le code SPH existant, le but étant d'une part de tester la robustesse de la méthode avec une loi complexe, mais aussi d'étendre le domaine de validité du modèle rhéologique. En comparant les résultats de nos simulations avec des expériences en laboratoire, nous espérons représenter de manière correcte des écoulements transitoires avec obstacle, et ainsi appliquer nos résultats à la protection en montagne. Avant de tester la loi en régime transitoire, nous devons nous assurer que les résultats sont corrects en régime permanent.

Résultats en régime permanent

Pour tester notre code en régime permanent, nous nous sommes placés dans une configuration d'écoulement particulière, en respectant certaines contraintes. Selon une étude menée par Y. Forterre sur les écoulements granulaires, des instabilités de surface peuvent apparaître pour des nombres de Froude dépassant 0.667. Nous nous sommes donc placés à Fr=0.548, ce qui

correspond pour des billes de verres de diamètre d=0.5mm à une pente de 23° et une épaisseur d'écoulement de h=1.2cm.

En ce qui concerne la mise en place de la simulation, nous avons construit un domaine fluide fini avec une condition de périodicité sur les parois amont et aval, nous permettant de développer un écoulement infini, à hauteur constante.

Pour valider nos simulations, nous avons utilisé des profils théoriques connus et établis à partir de la loi de comportement granulaire, tracés en violet sur les figures suivantes :





viscosité apparente



Critique des résultats

On remarque que les résultats souffrent de quelques imperfections. Au niveau de la surface, tout d'abord, les valeurs de la viscosité apparente sont assez imprécises. Ceci est dû au fait que la viscosité est calculée à partir du rapport $\frac{P}{\dot{\gamma}}$. Les valeurs des deux termes tendant vers

0 à proximité de la surface, le rapport est numériquement mal défini. Plusieurs pistes ont été explorées jusque là sans résultat.

Ensuite, les profils sont tous diffus à la base de l'écoulement. Ceci est probablement dû au traitement de paroi, qui est un point sensible de la méthode.

On obtient des profils de vitesse qui ont moins de 17% d'erreur. Ce n'est pas encore satisfaisant, mais les difficultés rencontrées au cours de cette étude sont tout de même encourageants.

Etalonnage des paramètres - Bilan

Avant de passer à l'étude prospective des écoulements transitoires, il est nécessaire de dresser un bilan sur les travaux effectués à ce point.

L'implémentation de la loi de comportement n'est pas triviale. Nous avons dû déterminer des seuils sur la viscosité et la pression, afin que l'écoulement démarre. En effet, comme pour un fluide de Herschel-Bulkley, le seuil physique n'est pas transposable directement à son équivalent numérique. Nous avons implémenté une loi bi-visqueuse en guise de seuil numérique.

Une fois cette étape passée, la méthode numérique nous a aussi posé problème. En effet, la méthode SPH est sensible, et pour tirer parti de la précision de son formalisme, il faut maîtriser tous les paramètres, qu'ils soient numériques ou physiques.

Le premier à entrer en ligne de compte est le nombre de particules. Entre précision de résultats et rapidité de calcul, il faut savoir trouver le juste milieu. Bien sûr, on s'aperçoit vite que les calculs n'aboutissent pas avec un nombre insuffisant de particules. Mais ce n'est pas tout. De nombreuses études menées par Philippe Lachamp, le créateur du code, ont mis en évidence un nombre de particules minimum en dessous duquel l'écoulement est systématiquement mal représenté. En effet, en dessous de 5 particules dans la zone cisaillée, les résultats sont faussés par une mauvaise discrétisation en espace. Il faut donc pour chaque loi de comportement, chaque cas d'écoulement, régler au mieux ce paramètre.

Ensuite, un autre point clé du traitement SPH est la vitesse du son. Sur ce point aussi, on trouve de nombreuses données bibliographiques. Le formalisme calcule la pression de la sorte : $P = c^2(\rho - \rho_0)$. De ce fait, nous sommes contraints à considérer des fluides légèrement compressibles. Cependant, nous pouvons réduire cette compressibilité en augmentant la vitesse du son c. De ce point découlent de nombreuses questions. Cette loi d'état est-elle valable pour un fluide granulaire? Comment doit-on appréhender la compressibilité du fluide? Il est clair que ce paramètre ne représente rien de physique, alors nous avons choisi de prendre une vitesse du son menant à des taux de compressibilité de moins de 0.1%. De ce fait, nous considérons des écoulements denses peu compressibles.
Pour stabiliser ce calcul de la pression, nous devons lisser les valeurs qui, de par l'absence de correction directe (exemple du décalage du calcul Vitesse / Pression en Volumes Finis), fluctuent assez fortement, dégradant la qualité de la résolution. Le lissage est en fait une moyenne glissante effectuée sur le proche voisinage de chaque particule. Cette opération a pour conséquence d'homogénéiser les valeurs. Il fat donc régler la valeur de la fréquence de lissage de façon à ce qu'il soit suffisamment efficace, mais le moins fort possible pour ne pas masquer les phénomènes physiques. Par exemple, un choc contre un obstacle va générer une augmentation de pression, mais le lissage aura tendance à influer sur cette brusque variation. Il faut donc manier cet outil avec soin.

De nombreuses options sont disponibles dans ce code, comme le changement du schéma de calcul, du calcul du tenseur des taux de déformation, etc. Nous ne rentrerons pas dans les détails, ici, des choix numériques que nous avons faits à ce niveau.

Le dernier point important est le réglage des données du fluide. La loi de Pouliquen est très complexe, et comporte un grand nombre de paramètres. Grâce à eux, on peut déterminer la gamme de pentes pour laquelle un régime permanent est envisageable, le nombre de Froude généré, etc. Nous avons pris les paramètres de billes de verre, donnés par Pouliquen. Ce matériau est très utilisé en laboratoire, ce qui nous laisse un grand choix pour d'éventuelles comparaisons.

Les premiers résultats obtenus avec ce code ne convergeaient pas à plus de 50%, et le calage des paramètres a nécessité de nombreuses heures de travail. La validation en régime permanent étant maintenant effectuée, nous pouvons traiter des cas de régime transitoire.

Etude de régime transitoire

Dans le cadre du projet OPALE, nous avons entrepris un travail en collaboration avec Pascal Perrotin, de l'Université de Savoie, qui travaille sur un dispositif expérimental de galerie paravalanche. Nous avons donc numériquement reproduit le canal expérimental, et effectué des essais dessus. Voici ci-dessous une image extraite de nos simulations.



Sur ces simulations, nous avons relevé, en accord avec les expériences sur le modèle réduit, les vitesses en amont de la cassure de pente au cours du temps, les contraintes normale et tangentielle en aval de la cassure :



Evolution temporelle des contraintes normales - capteur 0 -h20





Commentaires sur les résultats en régime transitoire

Tout d'abord, nous n'avons pu faire de tests que sur une seule hauteur d'ouverture de trémie. Le problème vient encore du nombre de particules. Avec des hauteurs d'ouverture trop faibles, le nombre de particules dans la hauteur est insuffisant, et donc, l'écoulement avance par paquets. Nous avons dû utiliser 7000 particules pour faire ce test, et le calcul a tourné pendant 270 heures. Ce temps est très rebutant, d'autant plus qu'il faudrait encore augmenter le nombre de particules.

Les résultats obtenus sont assez loin de ce que l'on peut observer sur le modèle réduit, mais un certain nombre de points est tout de même encourageant :

Les hauteurs d'écoulement révèlent des tendances plutôt bonnes. Les valeurs ne sont pas rigoureuses, mais l'écoulement réel donnant lieu à saltation en surface, et notre code n'étant prévu que pour des écoulements denses, il se peut que les résultats soient malgré tout assez corrects.

Les pressions relevées sont quant à elles légèrement sous-estimées. Les valeurs ne correspondent pas, mais on observe une tendance similaire à ce que l'on peut observer sur un écoulement réel. Le pic est significatif d'un impact, suivi de quelques oscillations autour d'une valeur plateau, jusqu'à atténuation complète de la contrainte. Les tendances des deux courbes sont simultanées, ce qui est bon signe. Cependant, les courbes devraient être liées par un coefficient de proportionnalité égal au coefficient de frottement interne au matériau, ce qui n'est pas le cas.

Dans cette configuration, le nombre de Froude dépasse parfois 10. Cette valeur est très élevée comparée à la valeur critique établie par Forterre. On peut donc se demander, avant les problèmes de validité de la loi de comportement en transitoire, si l'écoulement à si fort nombre de Froude est représentable avec le modèle de Pouliquen.

Conclusion

La plupart des résultats présentés sont encore améliorables, mais cela demande du temps. Un grand nombre d'études paramétriques ont été faites, mais il reste encore quelques points à régler. Le traitement de paroi pose encore certains problèmes, ainsi que la définition des grandeurs en surface.

Les dernières simulations effectuées pour l'optimisation en régime permanent montrent une amélioration du profil de vitesse, mais une dégradation des autres grandeurs. Il faut donc trouver le juste milieu pour tirer le meilleur du code.

Il se peut que les limites soient atteintes sur les simulations en régime transitoire au niveau du nombre de particules, qui rend le calcul extrêmement long. Nous devons envisager de réduire le temps de calcul (par exemple éliminer les particules ayant dépassé le point de mesure, à la place de les stocker dans un réservoir en aval du canal), ce qui signifie remanier le code.

Il serait aussi souhaitable de tester ce code sur un écoulement transitoire à Froude plus faible, en restant dans le domaine de validité de la loi en termes de dynamique. Le nombre de Froude est un paramètre important pour des écoulements à surface libre, et le fait que le matériau soit en partielle saltation en écoulement transitoire demeure un problème pour la compatibilité de nos simulations.

Références

Jop P., Forterre Y., Pouliquen O., Crucial role of side walls for granular surface flows: consequences for the rheology. J. Fluid Mech. 541, 167-192 (2005).

Jop P., Forterre Y., Pouliquen O., A constitutive law for dense granular flows. Nature Vol 441/8 June 2006.

Lachamp P., Faug T., Naaim M., Laigle D., Simulation of the effect of defence structures on granular flows using SPH. Natural Hazards and Earth System Sciences (2002) 2: 203-209.

Lachamp P., Modélisation numérique de l'effet d'un obstacle sur les écoulements de fluids à seuil par la méthode SPH. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, 2003, 149 p.

Tâche 3.5Expérimentation sur les écoulements granulairesMise au point de l'expérimentation en canal

Coordonnateur : P. Perrotin (LOCIE) Intervenants : M. Yin et M. Mommessin (LOCIE)

Introduction

L'expérimentation sur le site du col du Lautaret est basée sur des avalanches de neige à échelle réelle. Le fait d'effectuer un essai est donc très dépendant de la possibilité de déclenchement d'une avalanche. Le site du Lautaret ne permet pas de faire plus de 5 à 6 déclenchements par an, or notre objectif est de tester beaucoup de configurations de profil. L'influence de chaque profil sur les efforts obtenus sur la galerie pare-avalanches ne peut-être étudié uniquement à partir d'essais sur des avalanches réelles. De plus ces déclenchements produisent souvent différents types d'avalanche à cause des différentes quantités et qualités de neige. Pour obtenir des résultats reproductibles et comparables, il faut plusieurs années d'expériences. En plus, sur le site, on peut difficilement étudier les influences sur les changements de géométries (pente du couloir, inclinaison de la plaque) et les changements des conditions initiales (vitesse, hauteur initiales *etc.*).

Par conséquent, nous avons essayé de réaliser un modèle réduit sur un matériau analogique afin de pouvoir contrôler facilement les géométries et les conditions initiales et enfin maîtriser leurs influences sur l'écoulement et sur la structure. Le matériau granulaire a été choisi comme matériau analogique. Cette proposition a été présentée d'abord par Salm dans les années 1960 [Salm 1966] sur la base d'observation en site naturel. Effectivement, l'avalanche de neige est composée d'un mélange de grains de différentes dimensions, de différentes formes et de différentes densités. A l'arrêt, les grains de neige ont une dimension de l'ordre du millimètre et le manteau neigeux a une dimension de l'ordre du mètre, l'avalanche peut donc être considérée comme un milieu granulaire. Dans les années 1980, les travaux de Hutter et Savage sur les écoulements granulaires ont eu un certain succès [K.Hutter 1989]. C'est aujourd'hui le modèle hydraulique le plus avancé. Les mesures sur l'avalanche de neige dense et sèche par Dent [Dent 1998] montrent que le rapport entre la force normale et la force tangentielle est indépendant de la vitesse.



Figure 26. vitesse et coefficient de fortement dynamique mesurés [Dent 98]

En conclusion, le choix du matériau granulaire peut être assez représentatif du comportement d'une avalanche de neige dense et sèche. Or dans le cas des galeries pare-avalanches il semble que ce soit le cas le plus défavorable.

1. Présentation du canal d'écoulement

Le modèle réduit est basé sur les écoulements granulaires dans un canal incliné. Le canal est constitué de deux parties. La première partie est un canal rectangulaire incliné, appelé le canal supérieur. Cette partie représente un couloir naturel et il permet à l'écoulement granulaire de prendre de la vitesse. La deuxième partie est un canal peu incliné (canal inférieur) et il représente les structures sollicitées par l'écoulement (voir figure 27). Nous avons essayé de respecter le plus possible les lois de similitudes pour ce canal mais la démarche n'a pas été complète du fait des matériaux disponibles sur le marché. Pour les écoulements gravitaires, le

nombre de Froude $Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}}$ est un critère important. Il doit être maintenu du même ordre de

grandeur quand on passe d'une échelle réelle au modèle réduit dans le laboratoire [Faug 2004]. Pour l'avalanche de neige, le nombre de Froude est souvent compris entre 1 à 10 [Cazie 2003]. En faisant l'hypothèse que nous obtiendrons une vitesse u en bas du canal de l'ordre de 1 à 5 m/s, nous avons déterminé le dimensionnement du canal.



b Fiaure 27 : schéma simplifié

Canal supérieur

Le canal supérieur a une longueur totale de 6 m. Il est formé par de deux canaux en PVC gris de 4 m pour la partie supérieure et d'un canal de 2 m en PVC transparent pour la partie inférieure. La partie de PVC transparent en aval nous permet d'effectuer des mesures sur l'écoulement juste avant la rupture de pente. Deux profilés métalliques installés en dessous nous permettent de rigidifier l'ensemble du canal. Les dimensions transversales pour cette partie du canal sont : une hauteur de 20 cm et une largeur de 50 cm. L'épaisseur des parois est de 1 cm pour des problèmes de rigidité (voir figure 28). Le canal peut être incliné entre 0° et 45° .



Figure 28 : Schéma simplifié : Section du canal supérieur

Canal inférieur

Le canal inférieur est constitué d'une plaque et de deux joues latérales démontables. La plaque inférieure fait 1m de largeur et 2 m de longueur. Les joues latérales ont une hauteur de 0,3 m et elles viennent contre la partie extérieure du canal supérieur (soit une largeur de 52 cm). Le capteur de force est placé dans une ouverture effectuée dans la plaque de fond. Les caractéristiques du capteur sont présentées plus loin. La partie sensible du capteur vient affleurer la face supérieure.

Dans un premier temps le capteur d'effort est constitué d'un capteur de force piézo-électrique installé pour mesurer les efforts sur la plaque sollicitée par l'écoulement. Les positons du capteur peuvent être modifiées en déplaçant la plaque latéralement ou longitudinalement. Ceci nous permet d'étudier la distribution des efforts de l'écoulement dans l'espace. Les deux joues latérales démontables sont faites pour permettre les changements angulaires du canal. Selon la nécessité, l'inclinaison du canal inférieur peut varier entre 0° et 20°.



Système de transfert des billes en partie haute du canal

Une centrale d'aspiration transfert le matériau granulaire de la partie basse vers la trémie de stockage située au-dessus de l'extrémité supérieure du canal. La trémie a une capacité de 1000 l. Une plaque de limitation de l'épaisseur de l'écoulement granulaire ainsi qu'une porte d'ouverture ont été installées en partie supérieure du canal. En aval du canal inférieur, deux conteneurs métalliques sont déposés en parallèles pour recevoir les billes.



Figure 30. Trémie et centrale d'aspiration

Figure 31. Bac de récupération

Matériau granulaire utilisé

Les billes de verre ont été choisies. Le choix de la taille des billes est lié à deux facteurs.

Le premier facteur est l'effet du bord du canal. Le frottement entre les billes et les parois au cours de l'écoulement n'est pas négligeable. Mais cet effet diminue avec l'augmentation de la largeur du canal et avec la diminution des de la taille des billes. Généralement il est possible de considérer qu'il n'y a plus d'effet de bord lorsque la largeur de canal est supérieur que 600d (d est le diamètre de billes) [Pouliquen, 2005]. Dans notre cas, la largeur du canal est de 50 cm. On a donc d < 0,833 mm. C'est à dire le diamètre de billes est limité à 833 μm .

Le deuxième facteur est l'effet électrostatique. Quand la taille des billes est trop petite, l'effet de l'électricité statique peut influencer le comportement des écoulements et peut présenter des désagréments pour les opérateurs. Pour éviter cet effet, Pouliquen a proposé de ne pas avoir une taille de particules en dessous de $100 \,\mu m$, Thierry Faug propose $300 \,\mu m$ [Faug 2004]. En considérant ces deux éléments, nous avons choisit des billes de verre dont la taille est comprise entre $350 \,\mu m$ et $850 \,\mu m$. La taille moyenne est de $600 \,\mu m$, une granulométrie laser a été effectuée sur le matériau. La masse volumique est environ $1500 \,\text{kg/m}^3$. Des essais triaxiaux menés au laboratoire 3S ont permis d'estimer l'angle de frottement à 29° .

Rugosité

Nous avons choisi de mettre une interface rugueuse dans le fond du canal car un des objectifs de notre étude va consister à mesurer l'effort tangentiel sur un capteur placé en partie basse du canal. Or cette mesure pour être significative nous a conduit à augmenter le coefficient de frottement entre le matériau granulaire et le capteur. Ainsi nous avons choisi de placer du papier de verre entre l'écoulement et le fond du canal. Ceci a été fait sur toute la surface inférieure du canal pour éviter d'avoir de changements de mode d'écoulement lors d'un déclenchement.

Les tailles de grains sur le papier sont les même que celles des billes de verre. A priori, on peut considérer que l'angle de frottement au fond du canal et l'angle de frottement interne du matériau sont équivalents.

2. Paramètres ajustables

Les paramètres qui peuvent influencer l'écoulement sont les inclinaisons du canal supérieur α 1 et du canal inférieur α 2, la quantité de billes initiale Q, l'ouverture initiale *hi* et la position du capteur de force par rapport au bord du canal *Li* (voir figure 32). A priori, on n'étudie pas l'influence de la quantité de billes initiale. Elle reste une valeur constante d'environ une tonne pour chaque essai. Les paramètres ajustables et leurs variations sont listés dans les tableaux suivants (figure 33) :



Figure 32. Schéma simplifié : Paramètres ajustables

Inclinaison du canal sup. 1	Variation de 25° à 45°
Inclinaison du canal inf.	Variation de 10° à 20°
Position L1 du capteur	De 5 cm. à 20 cm.
Ouverture initiales	De 5 cm. à 20 cm.

3. Grandeurs physiques à mesurer

Notre but est de connaître les sollicitations exercées par les différents types d'écoulements à la rupture de pente voir un peu après. Donc les premières grandeurs physiques importantes à mesurer sont les efforts normaux et tangentiels dans la partie du canal inférieur. Les caractéristiques de l'écoulement (vitesse, hauteur, densité) avant et après la rupture de pente sont aussi les points importants de l'étude.

Mise en point de la mesure des grandeurs physiques

La mise au point de la méthodologie de mesure des grandeurs physiques a été réalisée avec une série d'essais. Pendant ces essais, l'inclinaison du canal supérieur α 1 et celle du canal inférieur α 2 ont été fixés à 43,6° et à 16,3° respectivement. La quantité de billes utilisée est de 600L. Le centre du capteur de force est positionné 6cm à partir du bord du canal (voir *figure 34*). Le seul paramètre variable est l'ouverture initiale. Cette valeur varie de 5 cm à 20 cm.



Figure 34. Schéma simplifié : mesure des grandeurs physiques

Le tableau suivant montre cette série d'essai réalisée. Les dates et les valeurs de l'ouverture initiales correspondantes sont listées dans ce tableau.

		ouverture	initiale	hi
N° essai	date	(cm)		
1	18/07/2006	10		
2	20/07/2006	15		
3	26/07/2006	20		
4	08/08/2006	20		
5	08/08/2006	20		
6	23/08/2006	20		
7	23/08/2006	5		
8	25/08/2006	10		
9	29/08/2006	10		
10	30/08/2006	10		
11	30/08/2006	15		

Figure 35 : Liste des essais et les conditions initiales

Vitesse du front et profil de vitesse (méthode PIV)

Présentation générale de la méthode PIV

PIV (Particle image velocimetry) est une méthode basée sur les traitements optiques ou numériques des images de particules principalement en forte concentration doublement ou multiplement éclairées par laser. Cette méthode est apparue au début des années 1980 et a été beaucoup développée depuis 1990 dans les domaines de la caractérisation d'écoulements turbulents instationnaires et de micro écoulements de particules. Son principe général consiste à enregistrer des images de particules (traceurs) à des instants successifs. La comparaison de deux images successives permet de remonter localement au déplacement du fluide afin de déduire les vecteurs de vitesse locaux correspondants à un instant donné.

La procédure de la PIV générale [site : Recherches en aéroacoustique et aérodynamique] est :

a. Ensemencement

Dans le fluide transparent, on ensemence des particules étrangères (traceur). En mesurant ensuite les vitesses de ces particules en suspension dans le fluide, on peut connaître le mouvement de celui-ci. La taille des particules traceurs doit être assez petite pour ne pas perturber l'écoulement mais à la fois suffisamment grosse pour être observée.



Figure 36. Schéma simplifié de la méthode PIV

b. Plan lumineux

La PIV principale requiert un plan lumineux pulsé. L'intervalle de temps entre deux plans lumineux dépend des vitesses de l'écoulement et de la précision souhaitée. Une source de laser continue est suffisante pour des applications à faible vitesse. Pour les vitesses importantes, le laser à impulsions et le système optique (composé de lentilles cylindriques ou sphériques) qui transforme le faisceau incident du laser en une nappe de faible épaisseur sont souvent utilisés.

c. Acquisition et traitement des images numériques

Les images de particules sont enregistrées à des instants successifs avec une caméra CCD ou caméra rapide. On traite ensuite ces images numériques pour obtenir les vecteurs de déplacement des groupes de particules. La procédure mathématique du traitement est la suivante:

- Subdiviser l'image entière (ou extraite) en plusieurs zone d'interrogation. Dans chaque zone d'interrogation, un vecteur correspondant sera calculé.
- Calculer les champs d'intensité d'image à l'instant t et t+ Δt pour chaque zone d'interrogation.
- Calculer la corrélation entre ces champs d'intensité d'image pour un intervalle entre deux images.
- Un palier de cross-corrélation est ensuite construit à partir des valeurs de corrélation de touts les intervalles entre images.
- Le déplacement le plus probable pour un intervalle donné est celui pour lequel la fonction de corrélation a une valeur plus élevée.
- Même procédure pour chaque zone d'interrogation.

Il existe deux méthodes pour calculer la corrélation [site ONERA] :

– Méthode d'auto corrélation

Le principe de la méthode d'auto corrélation est représenté sur la figure ci-dessous. Il consiste à diviser l'image en sous-domaines appelées fenêtres d'analyse. Les paires d'images sont enregistrées sur un même support. La fonction d'auto corrélation présente un pic central et deux pics secondaires symétriques. La position de ces pics secondaires par rapport au centre de la fenêtre d'analyse donne le déplacement des particules. La symétrie de la fonction de corrélation empêche de connaître le sens du déplacement qui doit être déterminé à partir de l'écoulement.



Figure 37. Méthode d'auto corrélation - 48 -

– Méthode d'inter-corrélation

Dans le cas où les deux images de particules seraient enregistrées sur des clichés différents, l'analyse est effectuée par inter-corrélation dont le principe est représenté sur la figure cidessous. Dans ce cas, la fonction d'inter-corrélation ne présente qu'un seul pic intense dont la position par rapport au centre donne accès à la direction, au sens et à la longueur du déplacement des particules dans la fenêtre d'analyse.



Figure 38. Méthode d'inter corrélation

d. Traitement des vecteurs de déplacement

La PIV donne les mesures instantanées, il est possible que certaines régions n'aient aucune signification physique. Donc, il est nécessaire de calculer un champ de vecteur moyen sur une séquence d'images données ainsi que les propriétés statistiques comme écart-type, coefficient de corrélation *etc*. Le nombre d'images nécessaires pour calculer le champ moyen dépend des caractéristiques de l'écoulement, des conditions expérimentales et de la qualité de l'image.

Les erreurs générales de la méthode PIV sont les suivantes :

- Reflet de l'environnement du laboratoire (lumière, objectifs etc..).
- Mouvements perpendiculaires au plan d'image pour une mesure en 2D.
- Augmentation du gradient de déplacement dans une zone d'interrogation.
- Angle entre le plan observé et la caméra n'est pas égal à 90°.
- Distorsion à cause de l'utilisation de focales courtes ou petites distances entre la caméra et le plan d'observation.

Méthode PIV pour l'écoulement granulaire

Pour les matériaux non transparents comme les matériaux granulaires, l'utilisation d'une tranche de lumière laser n'est pas nécessaire. La méthode PIV ne permet de mesurer que la

distribution de vitesse sur les surfaces visibles : la surface libre de l'écoulement ou les bords transparents du contenant. Dans notre cas, nous enregistrons l'écoulement avec deux caméras rapides, ce qui nous permet de calculer la vitesse à la surface libre et le profil de vitesse. Billes colorées ou non colorées

D'après le travail de thèse d'Adrian Daerr [Daerr2000], la meilleure solution pour faire de la PIV avec l'écoulement des billes de verre est de colorer 1% de billes avec de l'encre de chine. Le travail de S.P Pudasaini 2003 montre finalement que la coloration des billes n'est pas forcément nécessaire, mais ce travail a été réalisé sur les grains de grande taille (quelques millimètres), ce qui permet une bonne distinction des éléments les uns par rapport aux autres.

Dans notre cas, nous avons coloré 3% de billes avec de l'encre de chine. Après une série d'essais, nous trouvons que la coloration des billes n'influence pas les résultats de la PIV.

Eclairage

Les zones intéressantes doivent d'abord être suffisamment éclairées. Pour la partie de la zone lumineuse qui est dans le champ de caméra, la régularité de la lumière est nécessaire pour les traitements des images.

Un éclairage puissant (projecteur halogène 500 watts) a d'abord été utilisé. Avec cet éclairage, nous avons obtenu les images de bonne qualité, c'est à dire traitables numériquement. Cependant, après une série de traitement d'images, nous avons constaté que l'effet du courant alternatif sur la régularité de la lumière n'est pas négligeable.



En effet, le courant alternatif qui alimente l'halogène varie entre deux valeurs extrêmes. En France, la tension du secteur a une valeur efficace de 220V (U_{eff}) avec une période de 0.02s soit une fréquence de 50 Hz (voir figure 14). Ainsi, l'intensité de la lumière varie selon la tension appliquée au filament chauffant. Le courant devient nul chaque 0.01s. Cette tension nulle ne coupe pas complètement l'émission de lumière du fait de l'inertie thermique du filament.

Un essai simple nous a confirmé cet argument. Nous avons filmé des billes au repos avec une vitesse de la caméra rapide de 1000 images/s sous les même conditions d'éclairage. Le temps intervalle entre deux images est de 0.001 s. La valeur moyenne de gris de chaque image est ensuite calculée (0 = noir, 255 = blanc). Le niveau de gris moyen obtenu sur un ensemble de 25 images est compris entre 113 et 114. Le niveau moyenne par image fluctue en fonction de la tension d'alimentation entre 112 et 116. Après une séquence d'images moyennées, en traçant une courbe des valeurs de gris en fonction du temps, nous retrouvons la forme alternée et les périodes correspondantes (voir la figure 40).



Figure 40. Effet de l'impulsion du courant alternatif

Sur la figure précédente, un nombre de 10 images entre chaque minimum de gris est observée, ce qui correspond bien à la fréquence de 50 Hz du réseau électrique.

Pour résoudre ce problème d'impulsion qui perturbe beaucoup l'analyse PIV, nous avons essayé d'effectuer une moyenne glissante sur 10 valeurs d'images autour de chaque point. La figure 12 montre le résultat après le lissage. C'est une bonne méthode pour traiter l'effet de l'impulsion, mais le traitement devient très lourd quand le nombre d'image est important. De plus, on perd en précision car les valeurs sont moyennées sur les 11 images.



Figure 41. Lissage sur les données

Une autre solution, consistant à modifier le système d'éclairage a été préféré. Cette solution consiste à éclairer le champ de caméra avec une source lumineuse alimentée en courant continu.

Avec un courant continu, l'intensité de la lumière de l'éclairage reste constante. Théoriquement il n'existe plus d'effet d'impulsion. Les traitements numériques deviennent simples et directs. Mais la difficulté de cette méthode est de choisir un éclairage suffisamment puissant pour permettre l'analyse mais alimenté avec une intensité pas trop importante pour éviter les risques d'accidents.

Donc nous avons choisit une série de diodes électroluminescentes (montage parallèle + série) qui a une grande valeur d'intensité de lumière (2300 mcd) et une tension d'alimentation de 9.6V. Sur la figure 42 nous avons reporté les résultats correspondant à cet éclairage en conservant les mêmes conditions que pour le test précédent.



Figure 42. Stabilité de la lumière de diode en courant continu

Nous voyons que dans le cas d'une source de lumière continue, il subsiste encore des différences d'éclairages dans le temps, qui sont toutefois deux fois moins importants que dans le cas précédent, et très aléatoires. Ceux-ci sont peut-être due à la caméra (bruit numérique).

Caméras rapides

a. Caractéristiques des caméras

Deux caméras ultra-rapides identiques ont été installées pour enregistrer la surface et le profil de l'écoulement. Les caractéristiques de base des caméras sont montrées dans le tableau suivant :

caractéristique de base des caméras			
Contours COD minel comé (7 A une \$7 A une)			
Capteur	CCD pixel carre (7,4 um 17,4 um)		
Méthode d'enregistrement	Mémoire embarqué		
Capacité d'enregistrement	128MB: 544 imges plein format(2.2 seconds)		
	256MB: 1087 imges plein format(4.3 seconds)		
	384MB:1631 imges plein format(6.5 seconds)		
	512MB:2175 imges plein format(8.7 seconds)		
résolution	plein format : 512*480 pixels		
	autre format : 512*240; 256*240; 256*120 pixels		
	128*120; 128*80; 128*32 pixels		
niveau de gris	monochrome : 256 pas		
température d'ambiance	0 à 40°		

Figure 43. Caractéristiques de base des caméras rapides

b. Vitesse de caméra et champ d'image

D'après les travaux précédents de différents chercheurs [K.M. Platzer 2004], [K.Hutter 1989], l'écoulement granulaire dans un canal incliné a une vitesse moyenne de l'ordre de 1 à 4 m/s selon les différents angles d'inclinaison du canal. En conséquence, la vitesse de caméra doit être assez élevée. Par contre, plus la vitesse de caméra est élevée, plus la définition de l'image diminue.. Par exemple, pour une vitesse de 250 images/s, la définition de l'image est de 512*480 pixels (figure 43). La taille est de 256*240 pixels pour une vitesse de 1000 images/s (figure 45). Autrement dit, pour un même champ d'image, l'augmentation de la vitesse de caméra diminue la précision de l'image.



Figure 44. 512*480 250 images/s

Sur la figure 44, la partie plus claire représente une couche dense de l'écoulement, dans cette couche, les particules individuelles sont difficilement distinguables. A la "surface libre" où l'écoulement est beaucoup moins dense, quelques billes ou quelques traits de déplacements des billes sont observés. Pour exploiter ces images nous utilisons un logiciel de traitement d'images appelé WIMA dont la description se trouve dans le paragraphe suivant. Les calculs basés sur une séquence de ces images donnent des résultats pas très satisfaisants. A part quelques vecteurs déplacements à la surface libre, le logiciel n'arrive pas à donner de résultats pour la plupart des parties de l'écoulement.

Nous avons ensuite augmenté la vitesse de caméra à 1000 images/s (figure 45). Pour que l'on puisse obtenir le profil de vitesse sur toute la hauteur, il faut que le champ d'image soit suffisamment grand (5 ou 6 cm minimum pour la hauteur) afin de couvrir l'ensemble de l'écoulement. Avec ce critère, la précision d'image a été limitée. Malgré tout, la qualité de ces

images est meilleure que les images précédentes et les images peuvent être analysée avec WIMA.

Le logiciel WIMA

Le logiciel WIMA a été développé sous le langage C/C++ par le laboratoire de traitement du signal et instrumentation de Saint Etienne en 1992 [Ducottet 1994]. Un langage de macrocommandes, intégré au logiciel permet d'automatiser les traitements.

Procédure du module PIV sous WIMA

On cite un exemple de calcul sur les images de l'essai N°10 pour décrire la procédure de la PIV. D'abord, il faut choisir une séquence d'images ce que l'on veut traiter (figue 46 a). Ensuite il faut définir la taille et la période de la zone d'interrogation (figure 46 b). La taille de la zone d'interrogation correspond à la surface à partir de laquelle le principe d'auto corrélation décrit plus haut sera appliqué. La surface de cette zone est généralement prise à 32*32 ou 64*64 pixels. La taille de la période est souvent de 16*16 ou 32*32 pixels. Après définition de ces deux paramètres, on effectue le calcul à l'aide du module PIV et on obtient les vecteurs de déplacement entre deux images ou le vecteur déplacement moyen sur toute la séquence (figure 46 c).



Figure 46. Procédure de PIV

Calcul de la vitesse

La vitesse V est calculée par $\Delta d/\Delta t$. Δd est le déplacement de l'ensemble des particules dans chaque zone d'interrogation entre deux images successives. Δt est le temps entre deux images.

Pour l'exemple précédent, Δt est égale à 0,001s (1000 images/s). Les vecteurs moyens de déplacement sur 11 images sont obtenus par le calcul de PIV (figure 46.c), ce sont les valeurs moyennées dans le temps. On calcule ensuite les valeurs moyennes suivant toute la largeur à chaque hauteur, les valeurs sont ensuite moyennées en plus dans l'espace.

Enfin on obtient le profil de vitesse moyenné dans l'espace et dans le temps (voir figure 47).



Figure 47. Profil de vitesse moyenné dans l'espace et dans le temps

Sources d'erreurs supplémentaires de la PIV pour un écoulement granulaire.

A part les sources d'erreur générales de la PIV pour les fluides transparents, il en existe d'autres lorsque l'on applique la PIV pour l'écoulement granulaire. Parmi ces erreurs il y a les reflets des billes de verre dû à l'éclairage. Les billes brillantes dans l'écoulement sont issues d'un processus aléatoire, résultant de leur position par rapport à la source lumineuse. Entre deux images continues, le trajet d'une bille brillante est presque introuvable. Donc les billes brillantes peuvent donner des fausses informations pour le logiciel et enfin perturber le calcul de la corrélation entre les images. Le reflet des billes est lié à l'intensité de l'éclairage et la distance entre la caméra et le plan d'observation. En réglant ces paramètres, on peut diminuer ce phénomène mais on ne peut pas l'éliminer. En conséquence, nous avons écrit une macro sous WIMA pour limiter la luminosité de ces billes brillantes.



a. Reflets des billes (avant le traitement)



b. Reflets des billes (après le traitement)

Figure 48. Limitation les reflets des billes

Hauteur de l'écoulement

Principe de la mesure et matériels utilisés

Un plan laser et une caméra rapide ont été utilisés pendant la première série d'essais afin de mesurer à tout instant l'épaisseur de l'écoulement. Pour avoir un grand champ d'image, nous avons utilisé la plus petite valeur de la vitesse de caméra soit 250images/s. Le laser produit une ligne de lumière (figure 44.a),



Figure 49. Principe de la mesure de hauteur

Cette ligne se décale quand elle rencontre les objets. La distance entre le plan moyen et la ligne sur l'écoulement est liée à l'épaisseur de l'objet et l'angle d'incidence. Pour un même objet (même épaisseur), plus l'angle d'incidence de la lumière laser est petit, plus la distance de décalage est importante, la précision de mesure est ensuite plus élevée. Mais en même temps, la largeur de la ligne de laser devient plus importante, cet effet diminue la précision

de mesure. [Daerr 2002] a trouvé que le meilleur angle d'incidence égal à 10° mais cette valeur est très conjoncturelle par rapport à l'expérience effectuée. Pour notre cas, au lieu de régler cet angle, nous calibrons ce décalage avec une série de cales en début de chaque expérience. La série de cales est constituée par trois cales identiques d'une épaisseur de 10 mm. On obtient ensuite trois lignes de décalage, les distances entre ces trois lignes et la ligne originelle (L1, L2, L3) sont comptées en nombre de pixels (figure 44.b). En déduisant une équivalence entre pixel et centimètre, on peut enfin définir la hauteur d'écoulement. Il faut donner une valeur de précision sur cette mesure.







Figure 50. Mesure de la hauteur (Essai N°10)

Traitement numérique

La durée des écoulements est normalement de quelques secondes, nous avons donc des milliers d'images à traiter (chaque image donne une valeur de hauteur), le traitement manuel est très lourd et presque impensable. Par conséquent, nous avons développé un programme en Visual basic pour calculer automatiquement les hauteurs en fonction du temps.

L'idée c'est de définir la position de la ligne de laser (ligne blanche) de chaque image par les différentes valeurs de gris (0-255). La ligne blanche du laser est donc distinguée par les valeurs de gris les plus élevée. On extrait alors par seuillage et recherche du barycentre lumineux la position la plus probable du faisceau laser. La différence entre la position de ligne à un instant donné et celle de l'origine correspond à la valeur de la hauteur de l'écoulement exprimée en pixel. On retrouve enfin la hauteur réelle en reprenant le calibrage précédent.

Voici deux exemples de calcul. La figure 51 présente le résultat de l'essai N°10. La hauteur est quasi constante avec une valeur de 1.6 cm ceci avec une ouverture initiale de 10 cm ; après une phase de mise en régime, l'écoulement est quasi en régime permanent. La figure montre la difficulté à mesurer la hauteur dans les premiers instants de l'écoulement du fait de sa faible densité.



Figure 51. Essai N° 10

Le résultat de l'essai N° 3 est montré sur la figure 52. Plusieurs piques et une chute sont constatés. Avec une l'ouverture initiale de 20 cm, l'écoulement est toujours en régime transitoire, la réserve de matériaux granulaire ne permettant pas d'obtenir un régime établi.

Nous avons obtenu des résultats très différents en changeant une seule condition initiale (l'ouverture). Ce phénomène prouve la sensibilité des conditions initiales sur l'écoulement.



Figure 27. Essai N°52

Mesure des efforts

Capteur de force

Les efforts suivant trois directions ont été mesurés avec un capteur de force piézo-électrique du modèle 260A01 de la société PCB. C'est un capteur différentiel qui ne mesure que les différences des déformations. Le sens de l'écoulement est dans l'axe y. Suivant l'axe z, le capteur est précontraint sous 22.24 kN.



Figure 53. Installation du capteur dans la boite

Les caractéristiques du capteur sont listées dans le tableau suivant :

Les figures suivantes montrent un exemple des efforts obtenus (essai N°10). Un impact avec une durée d'une seconde est remarqué dans les résultats de trois directions. Cette durée d'impact (1s) ne correspond pas à la durée de l'écoulement (6-10s).





Figure 56. Effort suivant y essai N°10







Figure 58. Caractéristique du temps de déchargement sous effort constant

En fait, dès que la chaîne d'acquisition enregistre le premier impact de l'écoulement, le capteur d'effort commence à se décharger. Le temps de déchargement sous effort constant est donné par RC qui représente la constante de temps du capteur. Pour notre capteur, le temps de déchargement suivant z a une valeur minimale de 50 s. Suivant x et y, cette valeur est de 10 fois de plus (500s).

Donc avec ce type de capteur nous sommes capable de faire des mesures quasi-statique. La décroissance que nous pouvons visualiser sur les figures précédentes est en fait due au filtre passe-haut intégré dans la carte de conditionnement qui permet de faire

l'acquisition. Ce filtre ne pouvant être retiré, nous ne pouvons poursuivre les acquisitions avec cette chaîne.

Le capteur permet néanmoins d'obtenir les valeurs maximales des efforts et donc de fournir les éléments nécessaire pour dimensionner un capteur à jauge, ce qui n'était pas possible auparavant, compte tenu de l'incapacité de prévoir les plages d'effort qu'il allait subir.

Profil de densité

Idée principale

Nous avons essayé de chercher le profil de densité selon le même principe de traitement des valeurs de niveau de gris.

La couleur de l'image est très foncée quand il n'y a pas d'écoulement(figure 59.a) et elle devient claire quand les billes de verre passent. L'intensité de la couleur blanche varie selon la densité de l'écoulement (figure 59.b). Une fois définit deux seuils de valeurs de gris (nonbilles et densité maximale en statique tassé), en supposant une linéarité de la valeur de gris et la densité, on peut déduire la densité de l'écoulement à chaque instant et à chaque endroit sur le champ des images.



a. sans écoulement

b. au cours d'écoulement

Figure 59. Changement des couleurs

Traitement numérique

Le traitement est également réalisé sous macro Excel en Visual Basic. Avec des images données et l'outil macro, on peut calculer la valeur de gris sur toute la hauteur du champ d'image à une position et un temps donnés à partir des images de l'écoulement. Quand l'écoulement est en régime permanent, à chaque niveau de hauteur de l'image, la densité peut être considérée peu variable sur toute la largeur d'image. Pour diminuer la quantité de travail, on peut moyenner les valeurs de gris dans l'espace (sur toute la largeur d'image). L'essentiel de la division de hauteur est de ne pas mélanger des différents types de couches de l'écoulement.

Les résultats peuvent être montrés en chiffre et aussi en image. Voici deux exemples de calcul sur le calcul de la valeur de gris de l'écoulement.

h

h



Figure 60. Visualisation de la valeur de gris pendant tout l'écoulement (avec effet de l'impulsion)



Figure 61. Visualisation de la valeur de gris pendant tout l'écoulement (sans effet de l'impulsion)

t



Conclusion

La phase préliminaire à l'expérimentation a permis de mettre au point l'ensemble des appareillages de mesure et capteurs destinés à la mesure des vitesse, densité, efforts, ; elle a permis en outre de valider les méthodes expérimentales permettant d'exploiter ces mesures. Il est désormais possible d'enclencher une campagne d'expérimentation en canal, objet de la deuxième année du projet OPALE.

Références :

[Daerr 2000] A.Daerr, *Dynamique des avalanches*, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI (2000)

[Salm 1966] B.Salm, *Contribution to avalanche dynamics*. In Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanche, Davos, IAHS Press, Wallingford, Oxfordshire, UK, pp.199-214 (1966)

[Ancey 2006] C.Ancey, *Dynamique des avalanches*. Presses polytechniques et universitaires romandes, (2006)

[Ducottet 1994] C.DUCOTTET, *Etude de l'Application des transformées en ondelettes au traitement d'images d'écoulements obtenues par tomographie ou microholographie*, Thèse de doctorat, soutenue le 21 février 1994, directeur J.P. Schon, Université Jean Monnet, Saint Etienne,(1994)

[Dent 1998] Dent, J.D, Burrel, K.J, M.Y.Louge, *Density, velocity and dry measurements in a dry-snow avalanche, annals of glaciology*, 26,1998, p.247-252

[Pouliquen 2005] P.Jop, Y.Forterre, O.Pouliquen, comment coule le sable? vers une rhéologie des écoulements granulaire, EGIM, (2005)

[Cazie 2003] Rapport du projet européen CAZIE, Catastrophic Avalanche : Defense Structures and Zoning In Europe (2003)

[Savage 1991] Savage, S.B., Hutter, K, *The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I. Analysis.* Acta Mech.86, 201-223 (1991)

[Savage 1995] Savage, S.B., Hutter, K, *The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part II. Experiments.* Acta Mech.109, 127-165 (1995)

[Pudasaini 2000] S.P.Pudasaini, *Dynamics of flow avalanches over curved and twisted channels*, Thèse de doctorat, Darmstadt University of Technology (2000)

[Faug 2004] T,Faug, Simulation sur modèle réduit de l'influence d'un obstacle sur un écoulement à surface libre, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble I (2004)

[Site : Recherches en aéroacoustique et aérodynamique] [Site : Onera]

TâchesModélisation Eléments Finis d'une galerie paravalanche4 et 5.1

Dans le cadre de cette tache, il a été proposé de travailler suivant deux cheminements différents :

- Le premier propose une modélisation classique de l'ouvrage dans son « ensemble » en reprenant tous les éléments de structure, à l'aide d'éléments finis tridimensionnels séparés pour le béton et les armatures et en utilisant des lois de comportement classiques.
- Le second repose sur le principe « inverse » à savoir proposer une modélisation unidimensionnelle de la structure, mais à l'aide d'éléments finis capable d'intégrer les propriétés des armatures de manière intrinsèque. Ces éléments finis sont intégrés dans un code spécifique pour les problèmes dynamiques

On propose donc de regarder la double complexité de la modélisation d'une galerie paravalanche sous sollicitation dynamique, de manière « décorrélée ». Le premier cheminement a été appliqué aux éléments verticaux (poteaux); et le second aux éléments horizontaux. L'intérêt pour le concepteur est de savoir s'il peut faire un calcul statique équivalent, et si ce calcul n'est pas erroné par rapport à la sollicitation réelle dynamique.

I - Modélisation Eléments Finis d'une galerie paravalanche : comportement des poteaux

Coordonnateur : Labo 3S-R Intervenants : Dominique Daudon, Patrycja Szczurowska, (3S-R) Ma Ying – Pascal Perrotin (LOCIE)

Introduction

Une importante part du travail de modélisation concerne celle d'un paravalanche sous l'effet de l'ensemble du chargement avalancheux, poussée des terres et poids propres. Les structures de Génie Civil sont conçues avec les dispositions réglementaires des Eurocodes ou du BAEL. Toutefois les règles concernant les sollicitations avalancheuses sont établies à l'aide d'expertises inspirées des directives suisses [juin 1990]. Les structures paravalanches sont complexes et il est rare qu'une modélisation éléments finis « poussée » (EF) soit effectuée en amont. En effet, le béton armé est très hétérogène, les non linéarités tant géométriques que comportementales sont très nombreuses et rendent les calculs très coûteux. Des modélisations existantes d'ouvrages ont déjà été proposées (Delhomme 2005 – Berthet-Rambaud 2004) ; elles ont en général permis de comprendre le comportement à la rupture, avec la prise en compte de lois de comportement complexes.

L'une des dernières galeries paravalanches construites en France est celle de Montaulever sur la route d'accès à Val Thorens. Plusieurs partenaires d'Opale sont intervenus lors de sa conception : le Cemagref a rédigé, pour la DDE de Savoie, le rapport d'expertise préconisant les charges d'avalanche à prendre en compte, et les plans du paravalanche avec les spécifications béton armé ont été fournis par la société Tonello. Un modèle « générique » de ce type d'ouvrage en est tiré, afin de pouvoir faire des études plus générale et de mettre en place une démarche de diagnostic de la « marge de charge supplémentaire » que peut supporter un tel ouvrage.

Plusieurs analyses par Eléments Finis sont proposées la sensibilité vis-à-vis d'une sollicitation avalancheuse de différents paramètres relatifs à la « finesse » de la modélisation éventuellement nécessaires.

Nous présentons donc ces simulations effectuées avec le code abaqus, à partir d'une descente de charge sur les éléments verticaux les plus sollicités de la structure. Le chargement avalancheux est appliqué soit statiquement, soit dynamiquement, ou encore issus des données de l'avalanche réelle du 6 mars 2006 au Col du Lautaret. Le comportement non linéaire du béton a été pris en compte, ainsi que la présence des armatures longitudinales pour une représentation réaliste des structures

Les résultats des modélisations sont confrontés et la démarche de caractérisation de la marge de l'ouvrage en termes de capacité de chargement est présentée en se basant sur la surcharge d'initiation de la plasticité dans la structure.

1. Description et modélisation de la structure

A- Géométrie et conditions aux limites

L'ouvrage (figure 1) de plusieurs centaines de mètres, a été réduit à une « tranche » caractéristique, composé par d'éléments portiques supportant un réseau de poutraisons (figure 2).



Figure 1 : paravalanche de Montaulever (73): vues longitudinale et transversale de la RD117

L'objectif de la modélisation est un calcul de comportement global de l'ouvrage. L'effet d'une sollicitation dynamique avalancheuse et du poids propre et du poids des terres sont pris en compte.

Une tranche caractéristique d'ouvrage est considérée entre 2 joints de dilatation de la dalle (figure 2). Elle est composée d'une dalle, de 5 poutres transversales, de 2 entretoises entre chaque paire de poutres, d'un chevêtre, de 3 poteaux amont et « aval ».



Figure 2a : Coupe caractéristique du paravalanche (entraxe dans le sens de la route : 6 m).



Figure 2a : Tranche caractéristique du paravalanche

Le maillage en trois dimensions (3D) d'une telle structure est assez lourd. Il a été effectué avec une décomposition de la structure en sous-ensembles maillés indépendamment. Nous nous intéressons ici au comportement d'un poteau amont « central » de hauteur 4.45 m et de section 1.8 m² et d'une tranche de poutre de liaison entre poteau (figure 3). Cette

et de section 1.8 m² et d'une tranche de poutre de haison entre poteau (figure 3). Cette dernière est délimitée par son plan de symétrie vertical. Elle est donc représentée sur une longueur de 3 m et avec une section de $1.1m^2$, de part et d'autre du poteau. La continuité (portée de 6 m) sur trois poteaux est prise en compte dans les conditions aux limites.



Figure 3 : «géométrie du poteau amont et nomenclature du chargement ».

Les conditions aux limites du modèle sont :

- un encastrement du pied de poteau dans la fondation (déplacements et rotations nuls).
 Le comportement réel est sans doute plus souple compte tenu de la présence du sol autour de la fondation.
- le blocage des déplacements horizontaux sur les plans verticaux de la poutre de liaisons entre les poteaux de manière à faire état de la continuité de ses poutres béton armés.

B- Chargements appliqués

Les chargements appliqués issues de la descente de charge sont :

- Le poids propre du poteau lui-même, de la dalle.
- La poussée des terres via l'ancrage amont de la dalle dans le versant.
- Le chargement avalancheux : présence statique d'une couche de neige, ainsi que passage de l'avalanche (ce dernier est calculé à partir des directives suisses [juin 1990] en fonction de la pression dynamique exceptionnelle de référence choisie par Rapin [2000] (ici égale à 360 kPa, correspondant aux hypothèses d'un écoulement de neige de 400kg/m3, s'écoulant à 30m/s sur 3m de d'épaisseur).

La descente de charge sur les poteaux amont se fait par l'intermédiaire des appuis néoprènes (effort vertical) et du bossage acier (pour simplifier : effort horizontal). La continuité de la dalle sur plusieurs poteaux est prise en compte via un coefficient multiplicateur de 10% sur les chargements issus de la descente de charge aux poutres transversales (tableau 1).

	Effort	Effort	Caractéristique de détermination de l'effort :
	Horizontal	vertical	P2=(1.1*P1)*0.5
	(kN)	(kN)	
Poids	0	P1=432	ρ beton = 2500kg/m3
propre		P2=237.5	ρ acier=7800kg/m3
Poussée	P1=57.3	P1=62.3	Sol granulaire typique (γ =18 kN/m ³ , Φ = 34.5°, ID



Tableau 1 : résumé des efforts appliqués d'après Szczurowska [2008].

<u>Remarque</u>: L'analyse du tableau ci-dessous montre que si le poids propre du « toit » du paravalanche est environ 1.3 fois supérieur au chargement avalancheux, le poids des terres a une part nettement moins importante dans le chargement total.

Le poids propre des structures, ainsi que le poids des terres sont des chargements statiques, qui configurent l'état initial de la structure.

Le passage dynamique de l'avalanche sera étudié suivant deux voies différentes. La première voie considère un schéma en fonction du temps avec phase stationnaire (figure 4)



Figure 4: chargement dynamique avalancheux dit « profil 1 ».

La deuxième (figure 5), est issue des mesures d'une avalanche réelle tirée artificiellement le 6 mars 2006 au col du Lautaret dans le cadre du présent programme. Les pressions normale et tangentielle sont des mesures sur le macro capteur « de pression normal et tangentiel » puis La descente de charge sur les poteaux a été effectuée par éléments finis multifibres au Locie [Ma Ying – 2008] et sera détaillée dans le rapport final prochain.


Figure 5 : chargement dynamique réel dit « profil 2 »- avalanche du 6/03/2006

B-Lois de comportement

La modélisation comporte à la fois les renforcements acier et le béton. Pour ces deux matériaux, la loi choisie prend en compte le comportement plastique.

Pour le béton, le choix s'est porté sur le modèle « Concrete damage plasticity » implanté dans Abaqus :

paramètres	Béton B 50	paramètres du CDP model			
Du matériau		β	38°		
Elasticité du	béton	m	1		
E [GPa]	19.7(30)	$f=f_{bo}/f_{c}$	1.12		
ν	0.2	γ	0.666		
Ecrouissage en com	pression du béton	écoulement e	écoulement en traction du béton		
contrainte [MPa]	Crushing déformation [-]	contrainte [MPa]	Cracking déformation [-]		
15.0	0.0	1.99893	0.0		
20.197804	0.0000747307	2.842	0.00003333		
30.000609	0.0000988479	1.86981	0.000160427		
40.303781	0.000154123	0.86981	0.000279763		
50.007692	0.000761538	0.226254	0.000684593		
40.236090	0.002557559	0.056576	0.00108673		
20.236090	0.005675431				
5.257557	0.011733119				

Tableau. 2. Paramètres pour le modèle de comportement CDP d'un béton B50 d'après [T. LODYGOWSKI and T. JANKOWIAK -2005].

Ces paramètres correspondent à un béton B50, dont les paramètres élastiques ne sont pas typiques d'un béton ; aussi une simulation de sensibilité au module de Young a été effectuée à 30 MPa

Pour le comportement de l'acier, un modèle élasto-plastique parfait (figure 6) a été choisi d'après [Berthet Rambaud- 2004]:



Figure. 6. Schéma du comportement élasto-plastique de l'acier.

C- Modèle éléments finis



Le modèle éléments finis utilisé pour les simulations est présenté figure 7.

Figure 7: modèle éléments finis du béton (éléments tétraédriques de l'ordre de 10 cm) et du renforcement longitudinal (éléments Beam B32).

Le béton est discrétisé en éléments 3D tétraédriques à 4 nœuds (C3D4-abaqus). Le renforcement est constitués d'éléments linéaires unidimensionnel de type poutre (B32) noyés dans la structure béton (embedded éléments-Berthet Rambaud 2004). Seul le renforcement longitudinal a été pris en compte afin de simplifier le modèle. Les sections de béton : (1.8 m² à la base et 1.1 m² pour les poutres horizontales) sont supposés constantes. Celles de l'acier on été respectés en surface, mais le nombre de barres à du être légèrement réduits (tout en conservant la section d'acier) en raison des limitations du calcul.

Rappelons les conditions aux limites : encastrement en pieds de poteaux, et déplacement nul des deux sections de poutre suivant leur normale.

2. Résultats des analyses mécaniques numériques effectuées

L'objectif des analyses mécaniques est d'avoir accès au comportement limite de l'ouvrage. Les contraintes maximales sont apriori obtenues en flexion en pied du poteau. Lorsqu'elles sont nettement inférieures à la contrainte limite, le chargement neigeux maximal permettant d'atteindre le comportement limite est recherché. Il est alors possible de calculer le coefficient de « marge » de l'ouvrage en effectuant le rapport entre la charge initiale et la charge admissible. Nous présentons ici les résultats de calculs des simulations et notamment les contraintes maximales obtenues. Une ébauche d'estimation du coefficient de « marge » dans le cas du profil 1 est proposée.

Les analyses mécaniques effectuées sont donc les suivantes :

- Calcul statique global correspondant à la somme des chargements du tableau
- Analyse modale pour l'extraction des fréquences propres de la structure, avec ou sans renforcement d'armature
- Calcul dynamique suivant le profil 1, avec sensibilité à la prise en compte de l'amortissement du matériau, et du module de Young
- Calcul dynamique avec le profil 2

Les calculs dynamiques de l'action avalancheuse ont ensuite été effectués de manière implicite à partir d'un état initial de la structure précontrainte par les efforts statiques du poids propres des structures, et du poids des terres.

A l'issue des calculs, il a été extrait, pour le béton : les contraintes principales due à la flexion du poteau dans le béton, et pour l'acier les contraintes de Mises.

A partir des résultats obtenus sur le profil dynamique n°1, le coefficient de Marge a été calculé en considérant une augmentation homogène des composantes horizontales et verticales du chargement sur le poteau, jusqu'à atteinte des critères de rupture soit dans le béton soient dans l'acier.

A- Calcul statique

Les calculs statiques ont été exécutés avec et sans armatures. Les charges totales appliquées sont les suivantes (tableau 3) :

	Vertical load	Horizontal load
	[kN]	[kN]
P1	956.0	373.0
P2	524.0	202.0

Tableau 3 : chargement statique appliqué à la structure.

Le relevé des contraintes de flexion maximales sont obtenues à l'encastrement du poteau :

	Contraintes de flexion [MPa]			
	Von 1		Deplacement	
	Mises	tension	compression	[mm]
béton		2.76	-14.1	7.1

armature	97.9	-	-	6.9
Limites admissibles	500	2.9	40	L/300=20 mm
Tablacy 4 Décultate de l'angluse stationes avec les amostros				

Tableau. 4. Résultats de l'analyse statiques avec les armatures.

On remarque que la traction maximale dans le béton est quasi ment atteinte, ce qui correspond bien au besoin d'armature ; Les contraintes maximales en compression, ou dans l'acier sont loin des valeurs de plastification. L'ouvrage peut donc subir des chargements statiques encore nettement supérieurs.

B- Extraction de fréquences propres

L'analyse modale a été effectuée sans amortissement.

	Fréquences propres [Hz]					
Mode	Modèle sans armature Modèle avec armature ratio					
1	11.524	11.999	1.04			
2	56.437	57.590	1.02			
3	77.669	80.125	1.03			
4	83.291	85.432	1.025			
5	87.580	90.132	1.03			
6	156.99	159.79	1.02			

Tableau 5 : Extraction de fréquences propres avec ou sans armature.

Le premier mode est un mode de flexion du poteau. Comme attendu le renforcement raidi un peu la structure. L'ordre de grandeur du premier mode est similaire à celui des poutres supportant la dalle [martinez 2007] et [tableau 6].

Fréquences propres [Hz]					
Mode 1		Mode	K		
poteau		Poutre princip	ale1 [martinez 2007]		
Sans armature	Avec armature	Sans armature	Avec armature		
11.524	11.99	10.51	10.67		

Tableau 6. fréquences propres des poteaux (Szczurowska 2008) et des poutres (Martinez 2007).

C- Résultat du chargement dynamique dit profil 1

L'analyse a été faite de manière implicite avec ou sans amortissement de Rayleigh. Pour notre cas, les modes à amortir seront les deux premiers. Les coefficients de Rayleigh α and β pour l'amortissement sont calculés à l'aide de la formule suivante :

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = 2 \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \cdot \begin{pmatrix} \omega_2 & -\omega_1 \\ -1 & 1 \\ \overline{\omega_2} & \overline{\omega_1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{pmatrix} \qquad \begin{array}{c} f = 2\pi\omega \\ f_1 = 11.52Hz \\ \xi_2 = 56.44Hz \\ \xi_2 = 5\% \end{pmatrix} \alpha = 0.152$$

où ω_1 et ω_2 sont les deux premières pulsations propres ($f = 2\pi\omega$) et ξ_1 et ξ_2 sont les amortissements désirés sur les deux premiers modes choisis égaux à 5%

Les contraintes maximales obtenues sont toutes inférieurs aux contraintes admissibles (tableau 7) :

	Stresses (MPa) Sans amortissement		Avec amortissement de Rayleigh		Contraintes admissibles
	béton	Armature	béton	armatures	
Von Mises max		53,3		40.4	500 MPa (acier)
σ _{yy} max de flexion (traction)	9.5	-	8.53		40 MPa (béton compression) 10 MPa (béton traction)





Figure. 8. déplacement du poteau (nœud 170) (sans amortissement sur la courbe de gauche – avec amortissement sur celle de droite).

L'évolution du déplacement est représentée, et on note l'efficacité de l'amortissement. La valeur maximale est de 4,5 mm et 3 mm (qui reste inférieur à L/300) à comparer avec le déplacement sous le chargement statique, qui reste à 7 mm.

D- Sensibilité au module de Young

Les paramètres du béton B50 utilisé ne sont pas réellement typiques d'un béton classique. Aussi, sur le chargement dit profil 1, un calcul de sensibilité a été effectué avec un module de Young = 30 Mpa ce qui est plus courant.

	Contraintes	E= 19 MPa	Contraintes	E= 30 MPa
	(MPa)		(MPa)	
	béton	armature	Béton	armature
Von Mises Max	7,14	53.3	7.7	46.6
σ_{yy} max	9.5	-	9.06	

Tableau 8 : sensibilité au module de Young.

Comme attendu, les contraintes maximales ne changent guère dans le béton, ce sont les déformations qui sont modifiées, comme on peut le supposer à travers la diminution des contraintes dans les armatures.

E- Résultat du chargement dynamique dit profil 2

Les résultats obtenus pour le profil d'avalanche réel montrent des conclusions similaires à celui du profil 1: les déplacements maximaux sont du même ordre de grandeur, et les contraintes restent inférieures aux valeurs admissibles. Le comportement reste donc élastique. Le déplacement du sommet du Poteau (node 170) atteint une valeur maximale de 3.4 mm puis décroit jusqu'à 0.87 mm (figure 9). Cette valeur rémanente correspond au fait cette avalanche bien n'ayant pas eu de régime stationnaire long, a laisse rune épaisseur de neige non nulle a l'issue de son passage. La structure est donc plus chargée après le passage de l'avalanche qu'avant.



Figure. 9. déplacement au sommet du poteau (node 170) pour le Profil 2. Valeur maximale 3mm.

	Stresses (MPa)		
	Béton Armature		
Von Mises max	5.6	33.2	
σ_{vv} max	7.75	-	

Tableau.9. contraintes maximales obtenues pour le profil 2.

Les contraintes maximales sont plus faibles que dans le profil 1du fait d'un chargement finalement beaucoup plus lent que celui du profil 1, et quasiment sans régime permanent.

3. Comparaison des résultats – Evaluation de la charge limite

D'un point de vue général, sur l'ensemble des simulations numériques, on a pu constater que la structure reste entièrement en élasticité, ce qui est heureux pour le fonctionnement en service.

Il est intéressant de noter les effets des différents paramètres. Il a donc été calculé le rapport entre les résultats en contraintes de mises dans les armatures, pour les différentes simulations par rapport a une simulation de référence correspondant au cas « dynamique, profil 1, sans amortissement, avec E=19 MPa.

On retrouve donc cette comparaison dans le tableau suivant :

	Profil 1 sans amortissement E=19 MPa	Amortissement Rayleigh 5%	Module de Young 30 MPa	Profil 2 sans amortissement E=19 MPa	statique
Référence/ autre simulation	1	0.93	1.14	1.6	0.54

Tableau 10 : rapport entre simulation de référence et les autres cas.

Par ailleurs, l'ouvrage étant loin de l'état endommagé, il est intéressant de déterminer qu'elle pourrait être la charge avalancheuse qui peut conduire a la mise en plasticité des armatures ou la ruine de l'ouvrage en béton. Cette étude a été menée sur le profil 1 du chargement avalancheux.

Les valeurs obtenues sont les suivantes (tableau 11):

	verticale [kN]	Horizontale [kN]
P1	882.0	607.5
P2	485.1	326.3

Tableau 11 : chargement avalancheux menant à la plasticité.

Le déplacement maximal observé atteint dans ce cas 6 mm puis oscille entre 6.1 et 7 mm, soit du même ordre de grandeur que le cas statique.

L'initiation de la plasticité a lieu au niveau de l'encastrement du pied de poteau ce qui correspond a la zone la plus sollicite (figure 10).



Fig. 10. Déformations plastiques a) dans les armatures, b) dans le béton.

Il convient de ne pas oublier les conditions aux limites d'encastrement qui ont été choisies ici. L'implantation réelle est beaucoup plus souple, par la liaison avec la fondation, elle-même noyée dans le sol.

En comparant le chargement limite avec le chargement initial, déjà représentatif d'une avalanche exceptionnelle, on peut déterminer le coefficient de marge par rapport à la limite de chargement de l'ouvrage vis-à-vis des avalanches.

Notre configuration fournit dont le coefficient Marge= 2.8.

Compte tenu de l'influence des divers autres paramètres de sensibilité testés : module de Young, amortissement, avalanche réelle, Ce coefficient de 2.8, obtenu pour le profil 1, reste un coefficient minimal, mais fournit un bon ordre de grandeur.

Il s'agit la d'un coefficient pour un ouvrage fonctionnant dans les conditions initiales de conception, c'est-à-dire pour lequel le mode de chargement ne change pas.

Or, les ouvrages voient généralement la topographie qui les entoure évoluer régulièrement au gré des éboulements rocheux occurrents, même minimes. La pente au dessus de l'ouvrage se modifie en général de telle sorte que le point de rupture de pente se rapproche de l'ouvrage entrainant une augmentation de l'effet dynamique sur l'ouvrage : l'angle d'incidence du flux avalancheux augmente, et l'effet de choc frontal surcharge l'ouvrage. Ce coefficient de marge sera donc à rapprocher de l'effet d'une modification topographique pour mieux définir le coefficient de sécurité réel.

4. Conclusion

L'évaluation des performances de la structure d'un paravalanche a été initiée grâce au modèle éléments finis tridimensionnels, intégrant une loi de comportement réaliste pour le béton ainsi que pour les armatures, ainsi qu'une représentation des chargements possibles : poids propre de la structure, poussée des terres, et chargement avalancheux. Les analyses tant statiques que dynamiques ont permis de montrer que le fonctionnement en service de l'ouvrage est très bien respectes malgré des sollicitations avalancheuses exceptionnelles, et une simplification de certaines caractéristiques défavorable à la structure : conditions aux limites, propriétés élastiques, amortissement, *etc.* Une étude de sensibilité a permis de dégager les grandes lignes de l'influence des paramètres, montrant que l'analyse statique reste très défavorable à la structure.

La recherche d'un coefficient de marge de résistance de la structure, établi par rapport à une simulation de référence, a été effectuée. Il est obtenu en calculant le rapport entre les charges d'avalanches menant à la plasticité des armatures à la charge avalancheuse exceptionnelle permettant de dimensionner un ouvrage.

Une première estimation est proposée et doit essentiellement servir de piste à une démarche de caractérisation des ouvrages « neufs ». Il est ensuite intéressant de s'intéresser à l'évolution du chargement réel avalancheux lorsque la topographie de l'écoulement est modifiée à l'amont de l'ouvrage. Le coefficient de marge pourrait alors diminuer sensiblement, lorsque le point de changement pente sera déplacé près de l'ouvrage avec le dépôt d'éboulis récurant.

Il conviendra également d'élargir l'étude de sensibilité aux conditions aux limites d'encastrement du poteau, pour accéder à des conditions plus réalistes d'implantation d'ouvrage.

II- Evaluation de l'endommagement d'une structure : modèle simplifié Ying MA- Pascal PERROTIN

Cette partie du travail a fait l'objet d'un chapitre de la thèse de Ying MA. Le texte correspondant se trouve en en annexe.

A l'heure de la rédaction de ce rapport, les conclusions de la confrontation des deux cheminements ne sont pas rédigées, les détails seront exposés dans le traité MIM.

Toutefois, on peut tout de même signaler une certaine cohérence des résultats dans les deux cheminements, à savoir que lorsque la sollicitation est en mode dynamique lent (par exemple, avalanche du 9 février 2007), l'endommagement est plus important que lorsque l'on prend une sollicitation statique équivalente de même amplitude.

Bibliographie

ABAQUS v6.7 Documentation.

- [CEMAGREF 2000] : Conseil Général de la Savoie. Galerie paravalanche de Montaulever. Expertise sur les sollicitations à prendre en compte préconisée par François Rapin – Cemagref. Juin 2000.
- [P. BERTHET-RAMBAUD 2001], *Ouvrages en béton soumis aux avalanches :comparatif de deux outils de calculs*. Septembre 2001.
- [P. BERTHET-RAMBAUD 2004], Structures rigides soumises aux avalanches et chutes de blocs: modélisation du comportement mécanique et caractérisation de l'interaction « phénomène-ouvrage ». Juillet 2004.
- [T. LODYGOWSKI and T. JANKOWIAK 2005], Identification of Parameters of Concrete Damage Plasticity Constitutive Model. Foundations of Civil and Environmental Engineering; 2005.
- [D. COMBESCURE 2006], *Eléments de dynamique des structures. Illustrations à l'aide de CAST3M.* Septembre 2006.
- [F. DELHOMME 2006], *Etude du comportement sous impact d'une structure pare-blocs en béton armé*. Mars 2005

[SZCZUROWSKA 2008] Mémoire de Master international Laboratoire- 3SR université Joseph Fourier – juin 2008

[MA YING 2008] Thèse de doctorat – université de Savoie-à soutenir septembre 2008

Tâche 5.2Structures en maçonnerie

Coordonnateur : Cemagref ETNA (P. Duret, D. Bertrand, F. Nicot) Intervenants : Marc Givry (Architecte), URGC-INSA Lyon (A. Limam)

Depuis plusieurs décennies, les montagnes fascinent et attirent sans cesse plus fortement.

C'est ainsi que nous assistons à un important développement des zones déjà urbanisées, ainsi qu'à la création de nouvelles zones de dynamismes.

Dans un contexte de risque avalancheux, l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments dans les zones exposées est devenue une préoccupation d'actualité.

Depuis plusieurs années les recherches dans ce domaine ont abouti à la mise en place de nombreuses règles constructives, cependant les effets d'une avalanche sur une construction en maçonnerie restent aujourd'hui encore mal connus.

Pour combler cette lacune, une partie du projet de recherche OPALE (Ouvrages de protection et bâtiments pavillonnaires soumis à l'action d'une avalanche), a été allouée à la modélisation numérique, de type éléments distincts, des structures en maçonnerie de petits éléments exposées à l'impact d'une avalanche.

L'objectif de cette étude est double :

- Mettre en place un outil numérique (3DEC), basé sur la méthode des éléments distincts, permettant d'évaluer la vulnérabilité physique des façades en maçonnerie soumises à une sollicitation avalancheuse.
- Caractériser la résistance et le comportement des façades en maçonnerie soumises à une sollicitation avalancheuse en fonction de leur architecture afin de définir des règles constructives simples pour les bâtiments construits en zones exposées.

1. Modélisation sur logiciel 3DEC d'une expérience menée par le CSTB

1.1. Avant propos

Il s'agit ici de modéliser sur 3DEC un mur de contreventement en maçonnerie soumis à un chargement horizontal dans son plan.

Les objectifs de cette modélisation sont les suivants :

- Prendre en main le logiciel.
- Explorer le modèle numérique par comparaison avec les résultats des essais du CSTB.

1.2. Présentation du mur d'essai

Le but de l'étude menée par le CSTB est d'étudier le comportement d'un mur en maçonnerie creuse et non armée subissant un chargement horizontal dans son plan, chargement appliqué au sommet du mur.

Ce mur est construit par rangées horizontales successives de blocs (parpaings) jointoyées horizontalement et verticalement par du mortier.

Le tout est monté sur une semelle en béton armé, laquelle a été coulée horizontalement de façon monolithique.

Un chaînage vertical et horizontal totalement lié à la dalle est coulé sur la périphérie, après montage des blocs, afin de donner un confinement à la maçonnerie, d'augmenter la résistance à la flexion et en cisaillement, et d'ancrer cette dernière à son support.

Dimensions du mur (sans le chainage) : longueur = 3.5 m, hauteur = 2.4 m



Figure 1. Architecture du mur d'essai (en gris : la dalle, en jaune : le chaînage)

1.3. Présentation du dispositif expérimental

Le CSTB a mis au point un portique d'essais, composé d'un double bâti de réaction en acier, très rigide, qui, sous une charge de 1000 kN appliquée à une hauteur de 3 mètres, prend une flèche inférieure à 2 mm. Ce portique reçoit un vérin hydraulique asservi, d'une capacité maximale de 2400 kN. La charge est transmise de la tête du vérin vers le sommet du mur par l'intermédiaire d'une pièce mécanique coiffant le mur, pièce appelée casque. Ce portique de réaction est ancré à la plate-forme d'essai en utilisant des tiges en acier de haute résistance. Afin de limiter ses déplacements hors plan, le portique est contreventé latéralement.



Figure 2. Dispositif expérimental du CSTB.



Figure 3. Photographie du dispositif expérimental.

1.4. Caractéristiques des éléments constituants le mur

1.4.1. Les blocs

Les murs construits sont montés avec des blocs béton creux de dimension 20*50*20 cm



Figure 4. Photographie des blocs béton utilisés.

1.4.2. Le mortier

Les essais présentés dans cette étude sont jointoyés à l'aide d'un mortier de montage industriel, prêt à l'emploi et conditionné en sacs.

1.4.3. Les chaînages

Les maquettes comportent des chaînages horizontaux et verticaux conformément au procédé constructifs et à la réglementation française. Le ferraillage longitudinal est composé de 4 barres de 10 mm de diamètre et les cadres de fils espacés de 15 cm.

1.4.4. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont établies comme libres en tête du mur et encastrées en bas. Les déplacements hors plan du mur au niveau du casque sont limités par un guidage latéral.

1.4.5. Type de chargement

Le chargement horizontal appliqué est monotone croissant.

1.5. Analyse du comportement global du mur

- Analyse des courbes force-déplacement en tête.
- Inspection visuelle pour repérer les fissurations.

2. La modélisation sur 3DEC

2.1. Construction de la géométrie

- Construction des blocs.
- Construction du chaînage.
- Construction du patin de poussée : son rôle est d'appliquer un déplacement au sommet du mur (modélisation du vérin).



Figure 5. Mur modélisé sur 3DEC.

2.2. Les conditions aux limites

Encastrement appliqué sur la face inférieure de la première rangée de parpaing ainsi que sur la face inférieure des chaînages verticaux : représente l'encastrement entre le bas du mur et la dalle.

2.3. Les caractéristiques mécaniques des différents éléments

- Modèle des joints : modèle élastique plastique avec critère de Mohr-Coulomb.
- Modèle des parpaings : modèle élastique linéaire.
- Modèle du chaînage : modèle élastique plastique avec critère de Mohr-Coulomb.

2.4. Résultats



2.4.1. Analyse des courbes force – déplacement

Figure 6. Courbe force-déplacement au sommet du mur.

Regardons plus en détail ces résultats.

Résultats 3DEC :

- Vitesse de déplacement du patin = 2 mm/s.
- $F_{max} = 526 \text{ kN}$ (correspond à la force mesurée au moment de la rupture).
- Déplacement du patin sous $F_{max} = 3.364$ mm.
- Raideur de cisaillement = 156 kN/mm.
- Force après rupture = environ 250 kN.

Résultats expérimentaux :

- F_{max} = 556 kN.
- Déplacement du patin sous $F_{max} = 4,34$ mm.
- Raideur de cisaillement = 128 kN/mm.
- Force après rupture = environ 300 kN.

Bilan:

La courbe donnée par 3DEC et la courbe obtenue expérimentalement sont relativement proches l'une de l'autre, tant au niveau de la forme que des valeurs.

Il en va de même pour les valeurs numériques données par 3 DEC et celles issues des expériences : les résultats sont similaires.

Jusqu'à une valeur de déplacement du patin égale à environ 4 mm, le mur se trouve dans une phase de déformation élastique linéaire.

Cette phase est immédiatement suivie par une chute rapide de la force appliquée par le patin sur le mur, caractérisant la rupture massive des joints.

Après cette phase de rupture, suit une phase de glissement bloc/bloc.

2.4.2. Analyse du faciès de rupture

Remarque : Dans les figures 7 et 8 présentées ci-après, le vérin de poussée se trouve à droite du mur et applique un déplacement vers la gauche.



Figure 7. Faciès de rupture obtenu expérimentalement (CSTB).



Figure 8. Faciès de rupture donné par 3DEC.

Sur cette figure, les joints rompus sont représentés par des ronds bleus et les glissements par des flèches.

Bilan :

La zone de glissement se trouve au niveau du joint situé entre la 1^{ère} et la 2^{ème} rangée de parpaings, en considérant que la première rangée est celle qui se trouve en contact avec la dalle. De plus, la figure nous montre une désolidarisation entre le chaînage vertical gauche et le mur.

Le faciès de rupture donné par 3DEC et celui obtenu expérimentalement sont très éloignés l'un de l'autre.

Sachant que la rupture d'un mur subissant un cisaillement horizontal dans son plan est par principe en diagonale, comme de nombreux essais le confirment, nous sommes en droit de remettre en question les résultats de la simulation numériques.

Remarque : dans cette configuration de visualisation (affichage des joints cassés), 3DEC fait disparaitre certains éléments, tel que le chaînage horizontal, ou certaines portions d'éléments : chaînage vertical gauche, patin de poussée. En aucun cas cela est représentatif de la géométrie réelle du mur déformé.

2.4.3. Simulations complémentaires dans le but de comprendre le faciès de rupture obtenu.

Dans ces simulations, le chaînage est supprimé.

A. Influence de la vitesse de déplacement du patin sur la force appliquée par le patin / mur

Vitesse de chargement (m/s)	Cohésion joint (Pa)	φ (°)	Rm _{traction} joint (Pa)
variable	1.0e6	0.0	1.0e5

<u>Bilan :</u>

- Déformation élastique linéaire du mur indépendante de la vitesse de chargement
- Rupture franche pour des vitesses de chargement faibles
- Valeur de F_{max} indépendante de la vitesse de chargement
- Pour une vitesse de déplacement du patin faible (= 0.005 m/s) : la portion de courbe représentant le glissement bloc/bloc est quasi linéaire constante.



Figure 9. Influence de la vitesse du patin sur la force appliquée par le patin sur le mur.



Figure 10. Faciès de déformation.

Bilan sur le faciès de rupture ;

Rupture en diagonale quelque soit la vitesse de déplacement du patin.

B. Influence de l'angle de frottement des joints sur la force appliquée par le patin / mur

Vitesse de chargement (m/s)	Cohésion joint (Pa)	φ (°)	Rm _{traction} joint (Pa)	
0.005	1.0e6	variable	1.0e5	



Figure 11. Influence φ sur la force appliquée par le patin sur le mur.

<u>Bilan :</u>

- Pas d'influence de ϕ sur la raideur de cisaillement du mur : déformation élastique linéaire du mur indépendante de la valeur de l'angle de frottement.
- Valeur de F_{max} liée à φ : plus φ est grand, plus F_{max} est élevée.
- Force après rupture, correspondant au frottement blocs/blocs, liée à φ : elle augmente lorsque φ croit.
- Présence d'une zone après la rupture où la force appliquée par le patin sur le mur est nulle



Figure 12. Faciès de déformation pour un angle $\phi = 0^{\circ}$ à gauche et $\phi = 41^{\circ}$ à droite.

Bilan sur le faciès de rupture ;

Pour un angle $\phi = 0^{\circ}$, rupture en diagonale Pour un angle $\phi = 41^{\circ}$, rupture entre la 1^{ere} et la 2^{eme} rangée de parpaings





Figure 13. Influence de la cohésion sur la force appliquée par le patin sur le mur.

<u>Bilan :</u>

- Pas d'influence de "c" sur la raideur de cisaillement du mur : déformation élastique linéaire du mur indépendante de la valeur de la cohésion.
- Valeur de F_{max} liée à "c" : plus "c" est grand, plus F_{max} est élevée
- Valeur de F_{max} plus fortement influencée par "c" que par la valeur de la résistance maximale à la traction des joints (R_{Tm}) (cf. graphique page suivante) : ici on passe d'une force de 7.0e3 N à 4.0e5 N pour une valeur de "c" passant de 5.0e4 à 1.0e7 Pa.
- Pour des valeurs de cohésions élevées, la rupture n'est pas franche : zone en dents de scie (cf. courbe rouge)
- Force après rupture quasi indépendante de "c"

Bilan sur le faciès de rupture ;

Rupture en diagonale lorsque "c" est égal ou supérieur à 5.0e5 Pa

Rupture entre l'avant dernière et la dernière rangée de parpaings lorsque c est inférieur à 5.0e5 Pa.

D. Influence de la résistance max à la traction des joints (R_{Tm}) sur la force appliquée par le patin / mur

Vitesse de chargement (m/s)	Cohésion joint (Pa)	φ (°)	Rm _{traction} joint (Pa)
0.02	1.0e6	0.0	variable



Figure 14. Influence de Rm_{traction} sur la force appliquée par le patin sur le mur.

<u>Bilan :</u>

- Pas d'influence significative de R_{Tm} sur la raideur de cisaillement du mur : déformation élastique linéaire du mur indépendante de la valeur de la résistance max à la traction.
- Valeur de F_{max} liée à R_{Tm} : plus R_{Tm} est grand, plus F_{max} est élevée
- Valeur de F_{max} beaucoup moins influencée par R_{Tm} que par "c" (cf. graphique page précédente) : ici on passe d'une force de 5.0e4 N à 1.4e5 N pour une valeur de R_{Tm} passant de 1.0e3 à 1.0e7 Pa.

Bilan sur le faciès de rupture ;

Rupture entre l'avant dernière et la dernière rangée de parpaings lorsque R_{Tm} est égal ou supérieur à 1.0e6 Pa.

Rupture entre la 1^{ere} et la 2^{eme} rangée de parpaings lorsque R_{Tm} vaut environ 5.0e5 Pa

Rupture en diagonale lorsque $R_{Tm} = 1.0e5$ Pa

Rupture de tous les joints lorsque R_{Tm} est inférieur à 1.0e5 Pa

3. Evaluation de la vulnérabilité associée aux bâtiments en maçonnerie soumis à l'action d'une avalanche

3.1. Définition du problème

3.1.1. Avant propos

Le modèle présenté dans cette étude vise à décrire, par une première approche simplifiée de la problématique, le comportement d'un mur en maçonnerie soumis à l'impact d'une avalanche.

Pour établir ce modèle, une étude paramétrique est menée afin de caractériser l'influence de la dimension du mur, l'influence du remplissage des joints, ainsi que l'influence de la vitesse de chargement, sur la résistance de la façade.

3.1.2. Hypothèses simplificatrices

Dans un premier temps, l'étude est menée sur un cas simple. Le problème est réduit à un seul mur voile sur lequel sont appliquées des conditions aux limites qui reproduisent les caractéristiques d'une façade de bâtiment. Dans cette étude on considère que l'avalanche arrive perpendiculairement au mur. On considère également que la répartition spatiale de la pression exercée par l'avalanche sur le mur est uniforme. Le mur est uniquement constitué de blocs bétons (parpaings).



Figure 15. Le mur et la sollicitation avalancheuse.



Figure 16. Le mur modélisé dans 3DEC.

3.1.3. Les conditions aux limites

- Les quatre cotés du mur sont bloqués en déplacement, ce qui équivaut à un encastrement de la périphérie du mur.
- Sollicitation avalancheuse sur la face avant du mur caractérisée par le signal temporel de pression suivant :



Figure 17. Signal temporel de pression utilisé dans la simulation.

3.2. Les caractéristiques mécaniques du modèle

3.2.1. Les blocs

Les blocs, de forme rectangulaire, modélisent les parpaings :

- Taille nominale des blocs : 0,20x0,40x0,20 m.
- Modèle de comportement : déformation élastique isotrope.

3.2.2. Les joints

La maçonnerie est une structure composite constituée de blocs et de joints de mortier. Son comportement mécanique dépend de trois composants : les blocs, le mortier et l'interface bloc / mortier.



Figure 18. Constituants et interfaces d'un mur (agencement classique des blocs).

3.2.3. La loi de contact aux interfaces dans 3DEC

Les joints ne sont pas modélisés directement comme des éléments, mais indirectement par la loi d'interface des blocs. En d'autres termes, le comportement mécanique des joints est pris en compte de manière globale à travers la loi de contact introduite à l'interface des deux éléments en contact.

Cette loi permet de relier les contraintes s'exerçant à l'interface des deux éléments à leurs déplacements relatifs.



Figure 19. Modélisation sous 3DEC.

3.2.4. Loi de comportement du joint en mortier

Le modèle utilisé dans 3DEC autorise la translation des blocs suivant trois directions et la rotation de ces blocs autour de trois axes. Les blocs étant très rigides, la majeure partie des déformations du mur sont concentrée au niveau des plans de discontinuité que forment les joints de mortier. Les joints peuvent être soumis à deux sollicitations : la traction/compression et le cisaillement. La traction/compression dans les joints, qui est la sollicitation la plus simple, se produit lorsqu'il y a rotation des blocs tandis que le cisaillement, plus complexe, se produit lorsqu'il y a translation des blocs les uns par rapport aux autres.

Dans le deuxième cas, les joints sont cisaillés comme dans un essai de cisaillement où la force tangente de cisaillement (τ) serait engendrée par la pression de l'avalanche et la force normale (σ) serait créée par le poids propre du mur.



Figure 20. Contraintes de cisaillement dans le joint.

3.2.5. Comportement réel d'un joint de mortier

Le comportement des joints de mortier est du type élastoplastique avec radoucissement. Visuellement parlant, la réponse du joint de mortier à un essai de cisaillement (figure 15) présente un pic, suivi d'un radoucissement avec palier. La montée jusqu'au pic est quasi linéaire, de pente le module de cisaillement du joint (G) : la déformation est alors dans sa phase élastique. Au pic, la résistance maximale au cisaillement est atteinte (τ_{pic}), marquant le début de la fissuration et l'apparition du processus de perte de la cohésion (c). Une fois la résistance au cisaillement dépassée, la propagation des fissures dans les joints s'amplifie, conduisant à une perte rapide de la cohésion et donc par voie de conséquent à une forte diminution de la résistance. Le frottement pur prend alors son effet (τ_{palier}).



Figure 21. Modèle élasto-plastique d'un joint de mortier.

3.2.6. Comportement élasto-plastique utilisé dans 3DEC

Dans un premier temps le modèle de comportement des joints programmé dans 3DEC sera simplifié. Ce modèle est présenté dans la figure 22.



Figure 22. Loi de comportement modélisée sur 3DEC.

Le critère de rupture est celui de Mohr-Coulomb : $\sigma_m = c + \sigma$.tan ϕ

Avec :

- c : cohésion bloc / mortier.
- σ : contrainte normale de compression, au niveau du joint, liée au poids propre du mur.
- ϕ : angle de frottement bloc / mortier.

3.2.7. Les charges dans le plan du mur

C'est uniquement le poids propre du mur (bloc et mortier) défini par sa densité.

3.3. Comment définir les critères de ruine du mur ?

Du point de vu de l'architecte, trois valeurs sont intéressantes :

- La pression maximale que peut supporter la façade avant l'apparition de fissures.
- La pression maximale que peut supporter la façade avant l'apparition de déformations nécessitant la reconstruction du mur.
- La pression maximale que peut supporter la façade avant la destruction totale.

Les deux premiers points intéressent surtout les sociétés d'assurance. Le troisième point est primordial pour l'architecte puisqu'il concerne les risques encourus par les occupants de l'habitation. Du point de vue de la modélisation, la définition d'un critère de ruine reste une tâche difficile.

Trois critères de ruine peuvent être étudiés :

Le critère "50% de joints cassés" : on considère que le mur est détruit lorsque 50% des joints sont cassés.

Avantage : prend en compte le comportement du mur dans son ensemble

Inconvénient : ne permet pas de définir avec précision l'état de ruine puisque les joints détruits ne sont pas localisés.

Le critère "Déplacement relatif tangentiel entre blocs inférieur à une valeur seuil"

Avantage : l'endommagement local du mur est connu très précisément.

Inconvénient : le comportement est étudié localement, au niveau du point de mesure 3DEC, mais ne fournit pas d'informations au sujet du comportement global du mur; pour obtenir des résultats concernant ce dernier point, une étude complémentaire est possible mais le niveau de précision atteint reste faible.

Le critère "Ruine totale du mur" : correspond à l'effondrement du mur.

Avantage : c'est ce qui représente le mieux le critère de ruine

Inconvénient : demande des temps de calcul beaucoup plus longs car il est nécessaire de poursuivre la simulation jusqu'à la destruction.

Le critère "ligne de rupture dessinant une boucle fermée" (voir figure 23)

Avantage : prend en compte le comportement du mur dans son ensemble, représente un état d'endommagement pertinent.

Inconvénient : la lisibilité des joints cassés peut être difficile dans certains cas sur 3DEC rendant difficile la visualisation de la boucle.

Dans cette étude, nous nous intéresserons à ce dernier critère puisqu'il semble apporter les meilleurs résultats tout en demandant des temps de calculs relativement courts.

<u>Définition</u> :

Pression critique de pic $(\mathbf{P}_i^{\text{max}})$ = pression maximale appliquée sur le mur nécessaire pour obtenir une ligne de rupture formant une boucle fermée (voir figure 23).



Figure 23. Exemple de ligne de rupture dessinant une boucle fermée (en jaune).

4. Résultats obtenus

De nombreux paramètres, tant au niveau du mur que de l'avalanche, peuvent influencer le comportement et la résistance d'un mur soumis à une sollicitation hors plan.

Les essais présentés ci-après ont pour but de déterminer l'influence des paramètres jugés pertinents sur la vulnérabilité des façades.

4.1. Influence de la taille du maillage des blocs

Rappel : le maillage est constitué d'éléments tétraédriques

Valeur des paramètres imposés :

Taille des blocs (m)	Longueur mur (m)	Hauteur mur (m)	Vitesse de chargement (kPa/s)	% remplissage des joints verticaux	% de surface d'ouvertur e	Nombre total de joints
0.2x0.4x0.2	5.2	2.6	300	100%	0	474

Valeurs des paramètres mesurés :

Numéro de vignette	Taille moyenne maillage (m)	Pression (Pa) nécessaire pour détruire 50% des joints	Temps (s) au bout duquel 50% des joints sont cassés
1	0.4	98400	0.32
2	0.2	98400	0.325
3	0.15	98400	0.333



Figure 24. Aspects des différentes tailles de maillage.

<u>Remarque</u> : 3DEC possède un module qui règle la taille, la répartition et les rapports hauteur/longueur des tétraèdres composants le maillage en fonction à la fois des dimensions et de la géométrie des blocs maillés.

Typiquement, cette fonction se visualise sur la vignette 1 : le maillage, de taille moyenne 0.4 m, appliqué à des blocs de dimension 0.2*0.4*0.2 m, est calculé de façon à obtenir un nombre entier d'éléments dans chaque bloc, tout en minimisant les ratios hauteur/longueur.

Bilan :

Dans cette modélisation la taille du maillage n'influence quasiment pas les résultats. On a donc tout intérêt à utiliser un maillage assez grossier afin de réduire les temps de calcul.

Toutes les simulations qui vont suivre sont basées sur un maillage d'une taille moyenne de 0,20 m.

4.2. Influence de la longueur du mur

La hauteur habituelle d'un étage d'habitation variant relativement peu : 2,50 m à 3,0 m, la variable importante dans les constructions est la largeur du mur qui peut varier dans une fourchette plu vaste : 1 m à 10 m.

Quelle est l'impact du ratio longueur / hauteur d'une façade sur sa résistance ?

Valeur des paramètres imposés :

Taille des blocs (m)	Hauteur mur (m)	% remplissage des joints verticaux	Vitesse de chargement (kPa/s)	% remplissage des joints verticaux	% de surface d'ouverture	Nombre total de joints
0.2x0.4x0.2	2.6	100%	300	100%	0	474



Figure 25. Pression critique de pic en fonction de la longueur du mur.



Figure 26. % de joints cassés en fonction de la longueur du mur.

Bilan:

Deux constats s'imposent :

- Le mur impacté par l'avalanche est d'autant moins résistant qu'il est long.
- La variation de longueur influence d'autant plus fortement la pression critique de pic que le mur est de faible longueur.



Figure 27. Faciès de rupture (jaune) à la pression critique de pic relevé pour les murs d'une longueur supérieure à 4 m à gauche et inférieure à 4 m à droite.

4.3. Influence du taux de remplissage des joints verticaux

Suivant la qualité de la maçonnerie, les joints verticaux peuvent être plus où moins bien remplis.

Quel est leur influence sur la résistance du mur ?

Valeur des paramètres imposés :

Taille des blocs (m)	Longueur mur (m)	Hauteur mur (m)	Vitesse de chargement (kPa/s)	% de surface d'ouverture	Nombre total de joints
0,2x0,4x0,2	2.8	2.6	300	0	252
0,2x0,4x0,2	3.2	2.6	300	0	275
0,2x0,4x0,2	5.2	2.6	300	0	474
0,2x0,4x0,2	6.4	2.6	300	0	585



Figure 28. Influence de la hauteur de remplissage des joints sur la pression critique de pic.



Figure 29. Influence de la hauteur de remplissage des joints sur le % de joints cassés.

Bilan:

- La pression critique de pic augmente avec le taux de remplissage des joints verticaux.
- L'influence du remplissage des joints verticaux est d'autant plus importante que la longueur du mur est faible : pour un mur de 6.4 m de long, le passage de 10% à 100% de remplissage des joints verticaux occasionne une augmentation de la pression critique de pic de 100%; tandis que pour un mur de 2.8 m de long, la même variation de remplissage occasionne une augmentation de la pression critique de pic de 170%.
- Pour un même remplissage des joints verticaux, la résistance du mur décroit lorsque la longueur de ce dernier augmente. Ceci vient confirmer les résultats présentés dans le point précédent.
- Changement de la concavité des courbes suivant la longueur du mur : pour les faibles longueurs de façade, la variation du taux de remplissage des joints verticaux influence d'autant plus fortement la pression critique de pic que le pourcentage de remplissage est faible; à l'inverse, pour les longueurs importantes de façades, la variation du taux de remplissage des joints verticaux influence d'autant plus fortement la pression critique de pic que le pourcentage de remplissage est élevé.



Figure 30. Faciès de rupture (jaune et/ou ronds bleus) à la pression critique de pic lorsque le % de remplissage des joints verticaux et de 100% (1), 80% (2), 30% (3), 10% (4).

Pour un taux de remplissage des joints verticaux élevé, la zone de rupture est nette et concise : elle se situe proche de la périphérie du mur. Pour un taux de remplissage faible, la zone de rupture est diffuse : la plupart des joints sont cassés.

4.4. Influence de la vitesse de chargement

Dans la nature, chaque avalanche à sa particularité ; la neige peut être :

- Humide : forte densité, faible vitesse.
- Sèche : faible densité, forte densité.
- En aérosol : très faible densité, vitesse très élevée.

Chaque avalanche aura donc un profil temporel de pression spécifique. Conséquence : la vitesse de montée de la pression sur la façade impactée est variable. De manière générale, cette vitesse se situe entre 10 et 1.000 kPa/s.

L'objectif est d'étudier l'influence des effets dynamiques de l'avalanche sur la résistance du mur.

Valeur des paramètres imposés :
Taille des blocs (m)	Longueur mur (m)	Hauteur mur (m)	% de remplissage des joints verticaux	% de surface d'ouverture	Nombre total de joints
0.2x0.4x0.2	5.2	2.6	100 %	0	474



Figure 31. Influence de la vitesse de chargement sur la pression critique de pic.



Figure 32. Influence de la vitesse de chargement sur le % de joints cassés.

Bilan:

La vitesse de chargement ne modifie pas la résistance du mur : la pression critique reste inchangée quelque soit la vitesse de montée en pression.



Figure 33. Faciès de rupture (jaune) à la pression critique de pic, pour différentes vitesse de chargement.

4.5. Déplacements absolus des blocs



Figure 34. Déplacements absolus des blocs lorsque $P = P_i^{max}$

Ces résultats nous donnent des renseignements intéressants sur l'état de déformation du mur, à la fin de l'avalanche :

- Fort déplacement de la zone centrale du mur, celle qui est la plus éloignée des bords encastrés.

- Pas de déplacement sur la périphérie : condition d'encastrement.
- Pas de déformation discontinue.



4.6. Déplacements relatifs des blocs lorsque 50 % des joints sont cassés

Figure 35. Déplacements relatifs tangentiel entre blocs pour 50% de joints cassés.



Figure 36. Déplacements relatifs tangentiel entre blocs pour 50% de joints cassés.

La carte des déplacements relatifs est particulièrement intéressante puisque elle nous renseigne directement sur l'état de déformation des joints.

Bilan:

Les valeurs maximales des déplacements relatifs tangentiels entre blocs se situent à la périphérie du mur, au niveau des joints entre les blocs encastrés et ceux qui les jouxtent, représentées en rose et bleu clair sur les figures 35 et 36

En effet, c'est dans ces joints que la contrainte est maximale puisque la poussée reçue par chaque bloc va être transmise au suivant par leur intermédiaire, ceci de bloc en bloc jusqu'au bloc encastré. A chaque fois s'additionne donc la poussée des blocs voisins avec la poussée du bloc lui-même. Les efforts maximaux se trouvent donc dans les joints des blocs encastrés, ce qui se traduit par des déplacements maximaux dans ces mêmes joints.

Présence de déplacements secondaires en forme de "V", représentés en vert dans les figures 35 et 36.

Une zone dite "morte" située au centre du mur, où il y a peu voir pas de déplacements dans les joints.

Conclusions et perspectives

La gestion du risque avalancheux se décline de plusieurs manières dont en particulier l'élaboration de plans réglementaires conduisant au zonage des territoires exposés. Cette démarche suppose une connaissance suffisante de l'aléa et des conséquences de son action sur les biens exposés : habitations, voies de communication, etc.

La mise en place de l'outil numérique 3DEC, basé sur la méthode des éléments distincts, va permettre d'évaluer, par l'étude du comportement et de la résistance, la vulnérabilité physique des façades en maçonnerie soumises à une sollicitation avalancheuse.

L'étude, présentée dans ce rapport, s'intéresse à un modèle simplifié (hypothèses simplificatrices et paramètres matériaux généraux) permettant de donner un premier aperçu du comportement et de la résistance des murs soumis à un chargement hors plan.

Le premier bilan de l'étude est positif puisque, pour un temps de calcul relativement modique, le comportement et la résistance d'une façade impactée par une avalanche peuvent être connus dans le détail, et ce pour diverses géométries, dimensions, profils de pression, etc.

Les résultats de cette étude seront par la suite comparés aux résultats expérimentaux obtenus à la suite d'essais sur des murs soumis à des sollicitations hors plan sont actuellement menés par le laboratoire URGC de l'INSA de Lyon.

L'objectif étant d'ajuster le modèle numérique par comparaison des résultats numériques avec les résultats expérimentaux.

Dans ces conditions, il est très probable que d'ici peu de temps ces travaux conduisent à la mise en place d'outils d'aide à la décision performants, permettant de limiter les futures catastrophes et d'améliorer la protection contre les avalanches dans nos montagnes et vallées.

Annexe 1

Thèse de Ma Ying *Chapitre 5*

Programme OPALE

Décembre 2005 – Décembre 2008

Rapport final

Synthèse

Coordination :

Cemagref – Unité de Recherche ETNA François NICOT 04 76 76 27 70 francois.nicot@cemagref.fr

Rapport achevé le 18 janvier 2009

Rappel du contexte du projet et de ses attendus

Il est devenu un lieu commun que de parler de changement climatique. Les différents modèles de climats, globaux ou régionaux, semblent s'accorder à prédire une intensification de la circulation de l'humidité conséquente à une concentration accrue de gaz à effet de serre. Ainsi il semble que les événements météorologiques exceptionnels (tempêtes, fortes précipitations) deviendront plus fréquents sous les latitudes moyennes à l'inverse des régions subtropicales qui subiront moins fréquemment ces événements. Il est difficile et risqué d'établir un lien entre les catastrophes naturelles récentes et le réchauffement climatique mais rappelons certaines catastrophes des années 1999 et 2000. L'hiver 1999 fut particulièrement meurtrier avec 70 victimes (hors accidents de montagne) en France, Suisse et Autriche. Cet épisode fut lié à une situation météorologique extrême (températures basses et fortes chutes de neige). Plus récemment encore, l'hiver 2004-2005 restera comme l'un des plus rigoureux des quarante dernières années, associant des températures très basses à des précipitations neigeuses abondantes.

Par conséquent, il n'est pas raisonnable d'écarter les phénomènes avalancheux du registre des aléas naturels probables. Nous devons garder en mémoire que le changement climatique peut se traduire par des précipitations marquées à des niveaux d'altitude inhabituels qui pourront conduire à augmenter la fréquence d'apparition des phénomènes gravitaires rapides de grande ampleur comme les éboulements et les avalanches de neige. C'est dans ce contexte que le projet OPALE a été mis en place.

Ce projet s'est intéressé exclusivement à l'action de la neige sur les ouvrages, en s'appuyant sur les conclusions de projet PRANE (RGCU, 2001-2004). Il s'est proposé d'avancer sur ce domaine en examinant deux situations particulières : les impacts purement normaux, et les impacts tangentiels défléchis. Ces deux axes ont été accompagnés chacun par l'analyse de la réponse d'un ouvrage sous ce type de sollicitation :

- Réponse des galeries paravalanches sous sollicitation tangentielle
- Réponse des constructions en maçonnerie (de type pavillonnaire) sous sollicitation normale

Résultats fournis, programme de valorisation

Sur le plan scientifique

Les avancées scientifiques concernent le domaine du comportement des structures sous sollicitations statiques et dynamiques liées à la neige et de la connaissance des actions exercées par une avalanche sur une structure.

Tout d'abord, grâce aux travaux expérimentaux menés entre autre sur le site du Col du Lautaret, la sollicitation exprimée sous forme d'un champ spatial de pression, évoluant au cours du temps, a pu être quantifiée. En s'appuyant sur des techniques numériques d'analyse inverse, plusieurs signaux de pression ont pu être ainsi reconstruits, au cours des différentes avalanches qui ont été déclenchées artificiellement. De manière très générique, le signal de pression se compose d'abord d'un pic, de durée souvent très courte par rapport à la durée de l'impact, suivi d'une phase de décroissance vers un pallier résiduel. La comparaison avec la formulation classique $P = C \rho V^2$, montre que pour le pallier comme pour le pic, le coefficient *C* prend des valeurs différentes de 0.5. Bien entendu, les conclusions issues de ce programme de recherche devront être confrontées à d'autres mesures, réalisées sur d'autres

sites permettant le déclenchement d'avalanches de nature différente. Toutefois, ces éléments fournissent des bases intéressantes en vue du dimensionnement ultérieur des structures.

Conscients des limitations d'une démarche exclusivement expérimentale sur site, les acteurs du projet se sont tournés vers des techniques d'investigation en laboratoire avec des matériaux analogiques, puis numériques. Dans ce cadre, un dispositif expérimental, unique en France avec la hauteur de chute proposée, a été mis au point au LOCIE de Chambéry. Grâce aux techniques d'analyse d'image, des mesures de champs de vitesses et de densité ont pu être mesurés à proximité de l'ouvrage, et en amont. Ces mesures ont constitué des points de comparaison précieux en vue de calibrer les outils numériques utilisés par ailleurs : méthode SPH et méthode des éléments discrets (DEM). Ces outils numériques, même s'ils relèvent encore de la recherche, ont permis d'approcher de manière pertinente l'effet d'un écoulement granulaire sur un obstacle, en particulier au travers de la distribution de pression appliquée. En outre, la rhéologie de matériau, sa densité, semblent jouer un rôle fondamental au travers de la zone morte qui peut apparaître en amont de l'obstacle (structure). En perspectives, il conviendra de reprendre ce travail en essayant de s'approcher au mieux du matériau neige, au travers de la loi de comportement locale utilisée (méthode SPH, et DEM). Ces outils numériques constituent potentiellement une formidable extension de l'expérimentation sur site

Sur le plan de l'ingénierie

Actions des avalanches

Les techniques d'instrumentation et de mesures des paramètres de comportement de structures soumises à des phénomènes dynamiques ont été clairement décrites et mises à disposition. Ce transfert permettra d'envisager à l'avenir l'équipement de structures réelles en vraie grandeur. Les résultats de ce travail peuvent être à terme valorisés au niveau de la conception et du calcul des ouvrages au travers de l'amélioration de la connaissance du mode d'action de l'avalanche et la quantification des efforts. Des propositions d'évolution des règlements de calcul devraient en découler.

Les modélisations numériques réalisées ont fait l'objet d'une description détaillée des modes opératoires et conditions de mise en œuvre pour permettre leur reproductibilité.

Sollicitations sur les galeries paravalanches

Il a été montré l'importance de la prise en compte de la phase dynamique transitoire, sur l'endommagement des structures car il s'agit d'un impact lent. L'investigation des effets de la variabilité de l'amplitude de la sollicitation tangentielle a été réalisée de manière exploratoire à l'aide de méthodes aux éléments finis stochastiques. Il a pu être établi que la variabilité de la réponse de la structure, soumise à une sollicitation tangentielle, elle-même de variabilité donnée, devenait rapidement importante et non linéaire. Les résultats détaillés seront exposés dans le Traité MIM.

Constructions en maçonnerie

L'application de la caractérisation de la sollicitation normale d'une avalanche sur une structure au cas des bâtiments pavillonnaires a permis de progresser dans la qualification de la vulnérabilité physique des constructions existantes. Un outil informatique a été développé, basé sur une méthode aux éléments discrets, pour permettre de simuler la réponse d'une structure en maçonnerie soumise à l'action d'une avalanche. L'action de l'avalanche est modélisée au travers d'une distribution de pression variable dans le temps. La réponse de la structure, qui intègre des éléments architecturaux réalistes (ouvertures, chaînage, linteau,...), est tri-dimensionnelle ; elle se compose essentiellement d'une analyse cinématique, et en particulier d'une identification des zones (ou lignes) de rupture entre parpaings. L'influence du type de remplissage des joints entre parpaings, des conditions aux limites (chainage), du nombre, de la position et de la taille des ouvertures peut être examinée de manière directe. Afin de rendre cet outil utilisable en ingénierie, une interface conviviale a été développée (sous Java).

Opérations de transfert

Le transfert des connaissances développées au cours du projet sera réalisé de deux manières :

- Un Traité MIM sera publié aux éditions HERMES-Lavoisier. Intitulé « Neige, paravalanches et constructions », ce Traité permettra en une dizaine de chapitres de synthétiser les apports du projet, tant sur le plan expérimental que sur celui de la modélisation. Ce Traité est en cours de réalisation, et sa parution est prévue pour la fin 2009.
- Dès la création du projet, la volonté d'inscrire ce travail de recherche dans une logique de finalisation à l'usage des praticiens avait été clairement indiquée. De manière à porter à la connaissance des acteurs en charge de la gestion du risque avalancheux, les résultats de ce programme, un séminaire de dissémination présentant de manière très synthétique et digérée ce que le projet OPALE apporte par rapport à l'état de l'art existant, sera organisé en juin 2009. Ce séminaire se déroulera sur une journée, à Villard d'Arêne (Hautes Alpes), à destination d'élus, de gestionnaires, praticiens, techniciens et ingénieurs. Le choix du lieu n'est pas anodin : Villard d'Arêne est situé 5 Kms en dessous du Col du Lautaret, et les acteurs du projet OPALE souhaitent en effet faire découvrir par la même occasion le site d'étude expérimentale du Lautaret. En cours de journée, une visite commentée sur le site sera organisée, afin de bien faire ressentir les prouesses technologiques réalisées dans des conditions difficiles.

Enfin, et dans un souci d'ouverture et d'amélioration de la valorisation du projet, il convient de rappeler que le projet a été suivi de près au cours des trois années par un comité de pilotage rassemblant des personnalités confrontées à la gestion des risques naturels, et qui occupent une position de maîtres d'œuvre et de maîtres d'ouvrages :

- Monsieur le Maire de Moûtiers (Savoie)
- Monsieur le Président du SIVOM de la haute vallée de l'Arve
- Monsieur le Délégué national aux actions de Restauration des Terrains en Montagne

Fonctionnement du programme

Les différents partenaires du projet ont clairement exprimé lors de sa création une volonté de coopération et de mise en synergie de leurs compétences respectives. Cette disposition nous est parue indispensable pour le bon fonctionnement du projet, et le respect de son caractère structurant. Afin de faciliter l'application de cette disposition, l'organisation suivante a été adoptée et respectée :

Réunions d'avancement

Les réunions d'avancement étaient semestrielles. Elles ont rassemblé sans restriction les différents partenaires du projet. Mais nous avons souhaité que ces réunions accueillent également un comité de pilotage composé des personnalités suivantes :

M. Pierre PORTIER	Président du SIVOM Haute Vallée de l'Arve Mairie des Houches 15, place de la Mairie, BP 1 74310 – Les Houches
M. Olivier MARCO	Délégué national aux actions de Restauration des Terrains en Montagne (ONF) Hôtel administratif 9, quai Crequi 38000 – Grenoble
M. Philippe NIVELLE	Maire de la ville de Moûtiers (Savoie) Vice-Président de l'assemblée du Pays Tarentaise-Vanoise Mairie de Moûtiers, BP 23 73600 – Moûtiers

Les réunions d'avancement ont fait l'objet d'une présentation orale des travaux. Le Comité de pilotage, tous les 6 mois (mi juin et mi décembre), a pu ainsi contrôler l'avancement du projet et la qualité scientifique des travaux réalisés, puis veiller au respect des orientations d'ingénierie fixées au départ. Je dois avouer que ce dispositif a très bien fonctionné, et je salue ici la qualité de l'investissement des membres du Comité qui a permis de confronter sans cesse les résultats scientifiques obtenus à la réalité et aux exigences opérationnelles.

Réunions de travail

En outre, des réunions plus restreintes ont été organisées à l'initiative directement des acteurs du projet, afin d'aborder de manière spécifique une question litigieuse. Elles ont permis de faciliter les échanges entre les divers partenaires en permettant parfois la confrontation de cultures différentes. Des points techniques ou académiques particuliers ont été considérés, maintenant ainsi une bonne qualité de dialogue et de collaboration entre les partenaires, et facilitant la planification des différentes actions du projet.

Conclusion

Les apports du projet sont importants, et se déclinent en dispositifs expérimentaux uniques (expérimentations du col du Lautaret, pour le déclenchement des avalanches, et la mesure des actions exercées par les avalanches sur les structures; expérimentations en canal sur Chambéry), et en méthodes numériques avancées (analyse inverse, simulation numérique SPH, méthode des éléments discrets, développement d'un logiciel pour simulation de la réponse d'un mur en maçonnerie).

Le travail n'est pas fini, et au-delà de ce qui est aujourd'hui transférable à la fois vers la communauté académique et auprès de la sphère professionnelle, des points méritent quelques efforts complémentaires. En particulier, on doit rappeler que l'étude des avalanches et de leurs effets est tributaire des événements avalancheux que l'on peut produire. Les résultats expérimentaux obtenus sur le site du Lautaret constituent donc un échantillon qui n'est pas représentatif de l'ensemble des événements avalancheux qui peuvent se produire et endommager les enjeux humains. Ces réserves militent fortement pour une poursuite des travaux en s'efforçant – et cela rejoint une recommandation forte exprimée par les membres du Comité de suivi – de mettre en place un site d'étude majeur, européen, permettant d'accéder à des tailles et des natures d'avalanche beaucoup plus étendues.

Programme OPALE

Décembre 2005 – Décembre 2008

Rapport final

Résumés consolidés

Coordination :

Cemagref – Unité de Recherche ETNA François NICOT 04 76 76 27 70 francois.nicot@cemagref.fr

Rapport achevé le 18 janvier 2009

Ce projet s'est intéressé exclusivement à l'action de la neige sur les ouvrages, en s'appuyant sur les conclusions de projet PRANE (RGCU, 2001-2004). Il s'est proposé d'avancer sur ce domaine en examinant deux situations particulières : les impacts purement normaux, et les impacts tangentiels défléchis. Ces deux axes ont été accompagnés chacun par l'analyse de la réponse d'un ouvrage sous ce type de sollicitation :

- Réponse des galeries paravalanches sous sollicitation tangentielle
- Réponse des constructions en maçonnerie (de type pavillonnaire) sous sollicitation

Les avancées scientifiques concernent le domaine du comportement des structures sous sollicitations statiques et dynamiques liées à la neige et de la connaissance des actions exercées par une avalanche sur une structure. Ces avancées sont issues de travaux expérimentaux menés entre autre sur le site du Col du Lautaret. En s'appuyant sur des techniques numériques d'analyse inverse, plusieurs signaux de pression ont pu être ainsi reconstruits, au cours des différentes avalanches qui ont été déclenchées artificiellement. De manière très générique, le signal de pression se compose d'abord d'un pic, de durée souvent très courte par rapport à la durée de l'impact, suivi d'une phase de décroissance vers un pallier résiduel. La comparaison avec la formulation classique $P = C \rho V^2$, montre que pour le pallier comme pour le pic, le coefficient C prend des valeurs différentes de 0.5. Conscients des limitations d'une démarche exclusivement expérimentale sur site, les acteurs du projet se sont tournés vers des techniques d'investigation en laboratoire avec des matériaux analogiques, puis numériques. Dans ce cadre, un dispositif expérimental, unique en France avec la hauteur de chute proposée, a été mis au point au LOCIE de Chambéry. Grâce aux techniques d'analyse d'image, des mesures de champs de vitesses et de densité ont pu être réalisées à proximité de l'ouvrage, et en amont. Ces mesures ont constitué des points de comparaison précieux en vue de calibrer les outils numériques utilisés par ailleurs : méthode SPH et méthode des éléments discrets (DEM).

L'application de la caractérisation de la sollicitation normale d'une avalanche sur une structure au cas des bâtiments pavillonnaires a permis de progresser dans la qualification de la vulnérabilité physique des constructions existantes. En particulier, un outil informatique a été développé, basé sur une méthode aux éléments discrets, pour permettre de simuler la réponse d'une structure en maçonnerie soumise à l'action d'une avalanche.

Le transfert des connaissances développées au cours du projet sera réalisé en partie au travers de deux opérations :

- Un Traité MIM sera publié aux éditions HERMES-Lavoisier. Intitulé « Neige, paravalanches et constructions », ce Traité permettra en une dizaine de chapitres de synthétiser les apports du projet, tant sur le plan expérimental que sur celui de la modélisation. Ce Traité est en cours de réalisation, et sa parution est prévue pour la fin 2009.
- Un séminaire de dissémination présentant de manière très synthétique et digérée ce que le projet OPALE apporte par rapport à l'état de l'art existant, sera organisé en juin 2009. Ce séminaire se déroulera sur une journée, à Villard d'Arêne (Hautes Alpes), à proximité du Col du Lautaret. Ce séminaire sera à destination d'élus, de gestionnaires, praticiens, techniciens et ingénieurs.

OALE project was devoted to snow loading applied to structures, taking into account main results stemming from PRANE project (RGCU, 2001-2004). Two specific situations were considered: normal impacts and deflected tangential impacts. These both research lines were conducted in parallel with structure investigation subjected to normal or tangential loading:

- Paravalanche shelters response under tangential loading
- Masonry buildings response under normal loading

Scientific advances are related to structure behavior under both static and dynamic snow loadings, together with a thorough investigation of the loading exerted by avalanches onto structures. In particular, experimental investigations carried out on the experimental site (Col du Lautaret) have contributed to a remarkable progress in our knowledge. Based on numerical techniques related to inverse analysis, stress signals were computed from row data obtained from the experimental site during artificially released avalanches. From a general point of view, stress signal are composed of a strong peak, generally short in time, followed by a decrease toward a residual stress level.

Comparing with usual relation $P = C \rho V^2$ shows that coefficient *C* takes values different from 0.5. So as to overcome limitations induced by on-fields experimental investigations, laboratory tests were run by using analogical materials. These experiments were also used to calibrate numerical models. It is worth noting that the channel developed in Chambery (LOCIE) is a prototype, unique in France due to its size. Thanks to image analysis, both velocity and density fiends were measured. Such data constitute a valuable basis to calibrating and validating numerical models: Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method and Discrete Element Method (DEM).

Taking advantage of the characterization of the normal loading exerted by avalanches onto structures, the vulnerability of masonry buildings was considered. Based on a discrete element method, a numerical tool was developed to simulate the mechanical response of the structure as a function of a variety of architectural features, such as the boundary conditions and the number and size of windows as well.

Dissemination of the results obtained through OPALE project will be performed as follows:

- A treatise (MIM), entitled "Neige, paravalanches et constructions" will be published (HERMES-Lavoisier). This treatise, currently in progress, will synthesize in ten chapters main experimental and numerical results. It should be available from the end of 2009.
- A one-day seminar will be organized in June 2009. It will be held in Villard d'Arêne (Hautes Alpes), close to the Col du Lautaret. It will aim at disseminating the contribution of OPALE project, and showing how the results obtained make the state of the art progresses, toward engineers, practitioners and managers.

Programme OPALE

Décembre 2005 – Décembre 2008

Rapport final

Données factuelles

Coordination :

Cemagref – Unité de Recherche ETNA François NICOT 04 76 76 27 70 francois.nicot@cemagref.fr

Rapport achevé le 18 janvier 2009

Programme Génie Civil et Urbain (PGCU) 2005 : Rapport final du projet OPALE

A. Identification

Programme – édition	PGCU – Edition 2005
Projet (acronyme)	OPALE
Titre complet du projet	Ouvrages de protection et bâtiments pavillonnaires
	soumis à l'action des avalanches
Site Internet du projet	http://www.grenoble.cemagref.fr/opale/
Projet labellisé par	
le pôle de compétitivité	
Période du projet	1 ^{er} janvier 2006- 31 décembre 2008
(date début – date fin)	
Coordinateur du projet	CEMAGREF
(Société/Organisme)	
Rédacteur du rapport :	M. François NICOT
• Civilité, Nom, Prénom	CEMAGREF – Unité de Recherche ETNA
Société/Organisme	04 76 76 27 70
• Téléphone	francois.nicot@cemagref.fr
Adresse électronique	
Date de rédaction	Janvier 2009
Rapport confidentiel	non
(oui/non)	
Date de fin de confidentialité	

B. Liste des tâches et livrables

	Leader	Participants	Délivrable	Automne-Hiver Année 1	Printemps-été Année 2	Automne-Hiver Année 2	Printemps-été Année 3	Automne-Hiver Année 3	Printemps-été Année 4
TÂCHE 1 : Développement expérimentation	INSA								
Développement des moyens de caractérisation d'avalanches -				2 C					
Conception-mise en œuvre des capteurs de vitesse et densité	Cemagref	INSA	Cahier des charges						
Conception des macro-capteurs avec mesure d'efforts tangentiels	Ce <i>ma</i> gref	INSA, LOCIE	Cahier des charges	→	-				
Mise en place des macro-capteurs	Ce <i>ma</i> gref	INSA, LOCIE	Cahier des charges		*	•			
Conception de l'instrumentation des macro-capteurs d'efforts									
tangentiels	INSA	LOCIE	CdC et Cahier d'utilisation	≺ →	1				
Mise au point et gestion de l'acquisition des mesures	LOCIE	INSA	CdC et Cahier d'utilisation	<>	-				
			Rapports: caracteristiques du						
Développement en laboratoire du capteur (développement d'un banc			banc, instrumentation et	< >	< >	-			
d'essai dynamique structure et écoulement, test)	INSA	LOCIE, Cemagref	acquisition						
Caractérisation numérique (expérimentale) du microcapteur: etude de									
cas(galerie paravalanche, mur deflecteur,,,)	INSA	LOCIE, L3S	Rapport essais/calculs						
Réalisation des macro-capteurs -mise en place	Cemagref	INSA, LOCIE	Capteurs installés		< >	•			

TÂCHE 2 : Expérimentation	<u>Cemagref</u>							
						-		_
Déclenchement artificiel et caractérisation des paramètres nivologiques	Cemagref		Rapport d'avalanche - dossier					
Bilan et analyse évenement avalancheux (description, images,			photos et films numériques					_
paramètres de l'écoulement)	Cemagref							
Caractérisation topographique initiale MNT	LOCIE		Modèle numérique de terrain	→	_			
Acquisition mise au point in situ	LOCIE		CdC et Cahier d'utilisation		×	-	→	
Contrôle et reconfiguration expériences	INSA	LOCIE			<			>
Bilan et analyse du comportement de la structure (extraction et mise en			rapport par essais: analyse de la					
forme des résultats)	LOCIE	INSA	sollicitation	<				>

TÂCHE 2 : Analyze de l'internation ésoulement euvrerse								
TACHE 5 . Analyse de l'interaction écoulement-ouvrages -								
expérience	<u>Cemagref</u>							
			Rapport d'avalanche : profil					
			temporel, conditions de		-	<		>
Caractérisation des paramètres de l'avalanche	Cemagref	LOCIE, INSA	l'écoulement, rugosité etc					
			Synthèse méthodes existantes	-				
Bilan des méthodes d'estimation de l'action tangentielle de l'avalanche		INSA, Cemagref,	(année 1) , résultats des					
sur les ouvrages	LOCIE	J. Tonello	mesures (années 2 et 3)					
Analyse inverse (sur la base de la phase de qualification des structures			Profils d'efforts exercés sur la					
faites en laboratoire)	INSA	LOCIE	structure		$ \rightarrow $	-	<>	<>

TÂCHE 4 : Analyse de l'interaction écoulement-ouvrages -								
modélisation numérique	<u>Cemagref</u>							
Mise en place de la démarche de calcul - Développement du modèle						_		
3D SPH (Smooth Particles Hydrodynamics)	Cemagref		modèle de simulation 3D SPH					
Détermination des caractéristiques de l'avalanche réelle à une échelle			Données d'entrée pour les	-				
globale	Cemagref	LOCIE	modèles 3D SPH		-			
Modélisation de l'avalanche échelle locale (de type champ proche,			modèle d'action de l'avalanche			-		
SPH)	Cemagref	LOCIE	sur l'ouvrage					

TÂCHE 5 : Modèlisation du comportement des structures	L3S							
			Etude de sensibilité du					
			dimensionnement aux		< >	-	~~~>	 < >
			hypothèses d'estimation des					
			efforts - Protocole de					
Modélisation EF paramétrique (élastique) d'une structure réelle	L3S	INSA, LOCIE	modélisation					
Modélisation dynamique de l'action de l'avalanche sur une structure			Analyse avec modèle (rapport	-				
réelle (code Abaqus)	L3S		de modélisation)					

TÂCHE 6 : Valorisation	LOCIE						
Synthèse des méthodes actuelles de dimensionnement des galeries		INSA, Cemagref,					
paravalanches	LOCIE	J. Tonello	document de synthèse				
			Compte-rendu d'essais sur CD				
			(labo :INSA, avalanches :				
	LOCIE, INSA,		Cemagref, macro-capteurs in				
Bilan des campagnes expérimentales	Cemagref		situ : LOCIE)				
		INSA, Cemagref,	Organisation d'une journée de				
Diffusion des résultats	LOCIE	L3S	restitution avec la profession				
		L3S, LOCIE,					
Profil de sollicitation d'une avalanche	Cemagref	INSA,	Recommandation de profils				
	LOCIE, INSA,						
Amélioration des méthodes de conception - proposition	Cemagref, L3S		Rédaction de recommandations				
		INSA, Cemagref,	Compte-rendus de réunion,	$ \longrightarrow $	$ \longrightarrow $	_	<>
Suivi du projet - réunions de pilotage	LOCIE	L3S	planning et gestion du projet				

Tâche 7 : Sollicitation normale	INSA						
Qualification de la démarche d'analyse inverse	INSA	CETE, Cemagref	Processus de détermination des la distribution de contraintes normales	-			
		Connagron	appliquées à un obstacle				
Collation d'une base de données expérimentales in situ	Cemagref,	CETE, INSA	Base de données expérimentales renseignant sur la sollicitation avalancheuse appliquée à un obstacle	\longleftrightarrow	~~~~	~~~~	

Tâche 8 : Murs en maçonnerie	Cemagref						
Définition de profils architecturaux représentatifs	M. Givry	Cemagref	Liste de profils	\longleftrightarrow			
Développement d'un modèle numérique aux éléments discrets	Cemagref	CETE	Outil numérique simulant la réponse d'un bâtiment en				
	-		maçonnerie				
Analyse expérimentale du comportement d'un mur sous chargement hors plan Qualification du procédé de renforcement TFC	INSA	Freyssinet, Cemagref, CETE	Base de données expérimentales Guide d'utilisation du procédé TFC pour renforcement de bâtiments en maçonnerie vis-à-vis des avalanches				
Simulation numérique, retour d'expérience	Cemagref	M. Givry, CETE, INSA, Freyssinet	Outil de qualification de la vulnérabilité physique d'un bâtiment Guide de recommandations architecturales				

Indiquer les dates des réunions (lancement, avancement, clôture) des projets : Réunions semestriels d'avancement (incluant lancement et clôture) mi décembre et mi juin (2006, 2007, 2008)

Taux d'avancement de l'ensemble du projet: 95 %

C. Rapport factuel

C.1 Le tableau de résultats

Nombres de publications

	Interna	Fra	nce	Actions de diffusion			
	Articles acceptés dans des RICL*	Communicat. Internationales	Articles France	Comm. France	Articles vulgaris.	Conf. vulgaris.	Autres
Monopartenaire		3		2	2		
Multipartenaires	5	6		5			

* : Revues Internationales à Comité de Lecture

Autres retombées (voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique) :

Nature	Commentaires		
Brevets nationaux			
Brevets internationaux			
Autres (préciser en C.4)			

C.2 Le tableau de personnels

	Nombre de personnes employées en CDD sur le projet et financées par l'ANR			
	Nombre	Homme-Mois cumulés sur tous les partenaires depuis le début du projet		
Doctorants				
Post-docs				
Ingénieur en CDD				
Stagiaires	7	34		
Autres (à préciser)	technicien	2		

	Devenir des personnes employées en CDD		
	sur le projet		
	Emploi suite au projet		
Nom prénom qualification	Chez les	Ailleurs	En recherche d'emploi
Nom, prenom, quameation	partenaires		
	CDD ou CDI	CDD ou CDI	

C.3 La liste des publications et communications

FAVIER 2008 L-Favier-D- Daudon– F Donze . Calibration of a DEM granular flow model aiming at forecasting snow avalanches pressure- 19th ALERT Workshop – Aussois, October 2008.

FAVIER 2008 L-Favier-D- Daudon– F Donze .- J. Mazars Calibration of a DEM granular flow model aiming at forecasting snow avalanches pressure- 17th conference on Discrete Simulation of fluide dynamic Florianópolis, SC, Brazil- August, 4-8, 2008.

FAVIER 2007- L. Favier1 – D. Daudon1 _ F.V. Donzé1 – Y. Ma2 – P. Perrotin2 – J. Mazars1Sollicitation d'impact d'un écoulement granulaire sur un obstacle – CFM 2007 – 25-28 aout 2008- Grenoble- France.

FAVIER 2008- L. Favier – D. Daudon _ F.V. Donzé – J. Mazars Impact d'un écoulement granulaire sec sur un obstacle: modélisation et expérience- 26èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil – 4 juin 2008-Nancy-France.

Y. Ma, L. Favier, P. Perrotin, M. Mommessin & J. Mazars. Sollicitation d'impact d'un écoulement dense de matériau granulaire sur un obstacle – 18éme Congrès Français de Mécanique – Grenoble, 27-31 Août 2007.

Y. Ma, P. Perrotin, M. Mommessin, J. Mazars. "Modelling of the avalanche shed submit to the actions of gravity flows: Application to the avalanche of snow". The First ASICEF Workshop on Interdisciplinary Research Topics, Paris, 14th May 2006.

Y. Ma, P. Perrotin, M. Mommessin and J. Mazars. Measurement of the characteristics of a rapid dry granular flow. Powders & Grains, 13-17 July 2009 (submitted).

P. Berthet-Rambaud, Baroudi D., A. Limam, **E. Thibert,** Taillandier J.-M. (2008) Characterization of avalanche loading on impacted structures: a new approach based on inverses analysis. Journal of Glaciology, **54**(185), 324-332.

Thibert, E., D. Baroudi, A. Limam, P. Berthet-Rambaud (2008). Avalanche impact pressure on an instrumented structure. Cold Regions Science and Technology, 54, 206-2015.

D. Baroudi, E. Thibert (2009). An instrumented structure to measure avalanche impact pressure: error analysis from Monte Carlo Simulations. *Cold Regions Science and Technology (in press)*.

D. Baroudi, B. Sovilla, **E. Thibert** (2009). Comparison of avalanche pressure measurements from piezo-electric load cells and inverse analysis of deformation signals. *Submitted to Annals of glaciology*.

E. Thibert and D. Baroudi (2009). Impact energy of an avalanche on a structure. *Submitted to Annals of glaciology*.

Limam A., D. Baroudi, P. Berthet-Rambaud, **E. Thibert** (2007). De la mesure des efforts d'impact induits par une avalanche par analyse inverse. 8^{ème} congrès de Mécanique, 17-20 avril 2007, El Jadida, Maroc.

Limam A., D. Baroudi, P. Berthet-Rambaud, **E. Thibert** (2007). Upon the determination of impact loads by inverse analysis. Applied mechanics and material conference, 3-7 june 2007, Austin (Texas), USA.

D. Baroudi, E. Thibert, X. Ravanat, Limam A. (2008). Impact pressure estimation of an avalanche on a structure as deduced from inverse analysis and Monte Carlo sensitivity simulations. International Snow Science Workshop, 21-27 septembre 2008, Whistler, BC, Canada.

Naaim M., T. Faug, **E. Thibert**, N. Eckert, G. Chambon, F. Naaim and H. Bellot. Snow avalanches pressure on obstacles (2008). Proceedings of the International Snow Science Workshop 2008, 21-27 septembre 2008, Whistler, BC, Canada.

E. Thibert et D. Baroudi (2009). Impact energy of an avalanche on a structure. International Symposium on Snow and Avalanches, 6-10 April 2009, Manali, India.

D. Baroudi, B. Sovilla and **E. Thibert** (2009). Comparison of avalanche pressure measurements from piezo-electric load cells and inverse analysis of deformation signals. International Symposium on Snow and Avalanches, 6-10 April 2009, Manali, India.

E. Thibert, X. Ravanat, Baroudi D., P. Berthet-Rambaud, A. Limam, (2007). Caractérisation des impacts d'avalanches sur les ouvrages : une nouvelle approche par analyse inverse du comportement des structures. Société Hydrotechnique de France, Section de glaciologie, 15-16 mars 2007, Grenoble, France.

E. **Thibert**, D. Baroudi, A. Limam, P. Berthet-Rambaud and A. Limam (2007). Détermination des forces d'impact d'avalanche: approche par analyse inverse du comportement des structures. VOR, atelier n°3/2007 « risques naturels : modéliser décider », 7 juin 2007, Grenoble, France. (séminaire invité).

Thibert E., X. Ravanat, D. Baroudi, A. Limam et P. Berthet-Rambaud (2006). Mesure et analyse inverse appliquées à la détermination des forces d'impact d'avalanche sur les structures. Comité d'évaluation de l'unité de Recherche ETNA, Cemagref, 8 novembre 2006, Grenoble, (séminaire invité).

Thibert E. et X. Ravanat. Un site d'étude et de déclenchement d'avalanches : le Col du Lautaret. Première partie : un laboratoire de terrain en constante évolution. Neige et Avalanche, n°120, décembre 2007, 28-29.

Thibert E. et X. Ravanat. Un site d'étude et de déclenchement d'avalanches : le Col du Lautaret. Seconde partie : Pression générée par une avalanche sur un ouvrage. Neige et Avalanche, n°121. Mars 2008, 10-11.

C.4 La liste des éléments de valorisation

Mise au point d'un modèle dit « canon granulaire », modèle de simulation numérique en éléments discrets pour obtenir une évaluation des efforts d'impact d'un écoulement granulaire sur un obstacle, à l'aide du code YADE.

Une thèse sur le comportement des murs en maçonnerie soumis à des chargements hors plan a été lancée suite à ce projet. Le projet OPALE nous a permis d'investir sur ce sujet (Master de Mr BUI Trung qui continue cette année en thèse).

Un Traité MIM sera publié aux éditions HERMES-Lavoisier. Intitulé « Neige, paravalanches et constructions », ce Traité permettra en une dizaine de chapitres de synthétiser les apports du projet, tant sur le plan expérimental que sur celui de la modélisation. Ce Traité est en cours de réalisation, et sa parution est prévue pour la fin 2009.

Dès la création du projet, la volonté d'inscrire ce travail de recherche dans une logique de finalisation à l'usage des praticiens avait été clairement indiquée. De manière à porter à la connaissance des acteurs en charge de la gestion du risque avalancheux, les résultats de ce programme, un séminaire de dissémination présentant de manière très synthétique et digérée ce que le projet OPALE apporte par rapport à l'état de l'art existant, sera organisé en juin 2009. Ce séminaire se déroulera sur une journée, à Villard d'Arêne (Hautes Alpes), à destination d'élus, de gestionnaires, praticiens, techniciens et ingénieurs. Le choix du lieu n'est pas anodin : Villard d'Arêne est situé 5 Kms en dessous du Col du Lautaret, et les acteurs du projet OPALE souhaitent en effet faire découvrir par la même occasion le site d'étude expérimentale du Lautaret. En cours de journée, une visite commentée sur le site sera organisée, afin de bien faire ressentir les prouesses technologiques réalisées dans des conditions difficiles.