HAL open science

Analyse de l'effet d'une avalanche de neige sur un ouvrage de protection type Galerie ParavalancheExpérimentation - Modélisation

Ying Ma

▶ To cite this version:

Ying Ma. Analyse de l'effet d'une avalanche de neige sur un ouvrage de protection type Galerie ParavalancheExpérimentation - Modélisation. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Savoie, 2008. Français. NNT : . tel-00351762

HAL Id: tel-00351762

https://theses.hal.science/tel-00351762v1

Submitted on 11 Jan 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE SAVOIE
SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE SAVOIE

Spécialité : Génie Civil et Sciences de l'Habitat

Analyse de l'effet d'une avalanche de neige sur un ouvrage de protection type galerie paravalanche

Expérimentation - Modélisation

Présentée par

MA Ying

Soutenance le 4 septembre 2008, devant le jury composé de :

M. Ali LIMAM	Professeur à L'INSA de Lyon	Rapporteur
M. Daniel BOISSIER	Professeur à Polytech'Clermont-Ferrand	Rapporteur
M. Dominique LAIGLE	Chargé de recherche HDR au Cemagref	Examinateur
M. Jacky MAZARS	Professeur à L'IPG	Directeur de thèse
M. Michel MOMMESSIN	Maître de conférences à Polytech'Savoie	Examinateur
M. Pascal PERROTIN	Maître de conférences à Polytech'Savoie	Directeur de thèse

Thèse préparée au sein du

Laboratoire Optimisation de la Construction et Ingénierie de l'Environnement du Bourget du Lac
en collaboration avec le laboratoire Sols, Solides, Structures – Risques – UJF - IPG

Remerciements

Je remercie tout d'abord Jacky Mazars de m'avoir donné l'occasion et la chance de mener ce travail de thèse.

Je remercie également Pascal Perrotin et Michel Mommessin pour leur encadrement et leur soutien tout au long de cette thèse. Leurs conseils avisés m'ont permis d'avancer dans ce difficile travail, autant d'un point de vue technique que théorique, car beaucoup de questions se sont posées tout au long de mes recherches, certaines menant à de difficiles remises en cause. Pascal et Michel ont également été très patients avec moi, surtout lors de la relecture de ce rapport et de toutes les coquilles de français se trouvant dedans.

Je remercie le CEMAGREF de Grenoble pour le support technique lors des essais au col du Lautaret, en particulier Emmanuel Tibert et Xavier Ravanat.

Je remercie les techniciens de la halle technique Raymond Sedano et Thierry Goldin, sans qui je n'aurais jamais pu mettre en place le canal d'écoulement granulaire et son instrumentation diabolique.

Mes collègues, Fan Yilin, Zoheir, Franck, Ammar et Augustin, ont su maintenir une ambiance détendue mais studieuse. C'est grâce à leur présence que ces années ont avant tout été enrichissant humainement.

Je tiens enfin à remercier ma famille pour leur soutien moral et les petits colis de nourriture qui m'ont permis de tenir le coup au début de mon séjour en France. Enfin je tiens à remercier Raphaël pour son soutien dans la vie de tous les jours.

Résumé

Les avalanches de neige sont un des risques naturels majeurs des régions montagneuses. Les grandeurs physiques de l'avalanche telles que la vitesse, l'épaisseur et la densité sont difficiles à évaluer au sein même de l'écoulement, alors qu'elles sont à la base des modèles d'avalanche. C'est pour ces raisons que la détermination des sollicitations exercées par l'avalanche de neige sur les ouvrages de type galerie paravalanche s'avère problématique. Le niveau de protection de ce type d'ouvrage est donc difficilement quantifiable. Dans une première partie de ce travail, nous avons fait un inventaire des ouvrages de protection et des modèles d'avalanches couramment utilisés. La deuxième partie de notre travail porte sur la connaissance et la détermination des sollicitations avalancheuses et, leurs variations spatio-temporelles sur les structures de type galerie paravalanche. Pour ceci, une expérimentation a été réalisée sur une plaque instrumentée de capteurs de force placée dans un couloir d'avalanche sur le site naturel du Col du Lautaret. Pour compléter ces résultats, une expérimentation d'écoulement granulaire dans un canal incliné a été mise en place. Les résultats expérimentaux montrent que les sollicitations d'impact ont des valeurs très élevées proche de la rupture de pente et qu'elles décroissent rapidement avec l'augmentation de la distance par rapport à cette rupture. La dernière partie de notre travail consiste à étudier avec le logiciel EF Fedeaslab les réponses dynamiques de la structure des galeries paravalanches sous les chargements avalancheux obtenus expérimentalement. L'effet dynamique sur la structure a été quantifié en comparant les réponses de la structure sous chargement dynamique puis statique.

Abstract

The snow avalanche is one of the major natural hazards in mountainous regions. The modelling of snow avalanche depends on the precise estimation of physical properties of the avalanche such as velocity, height and density, which are difficult to assess in the flow. For these reasons, the determination of solicitations performed by the snow avalanche on the snow shed becomes problematic. The level of protection of this type of structure is therefore difficult to quantify. In the first part of this work, we draw up an inventory of the structures of protection and the models of avalanches commonly used. The second part of our work concerns the determination of the solicitations of the avalanche as well as the effects of their spatial and temporal variations on the snow shed. For this, an experiment that consists of a plate of instrumented force sensors in the natural site of "Col du Lautaret" was carried out. To complement these results, an experiment of granular flow in an inclined canal was implemented in laboratory. The experimental results show that the values of the impact solicitations are very high at the rupture of slope, and they decrease rapidly when the distance to the rupture of slope increases. The last part of our work is to study the dynamic responses of the snow-shed structure under avalanche loads obtained by experimentation, using the EF software Fedeaslab. The dynamic effect on the structure has been quantified by comparing with the calculations under static loads.

Sommaire

PREAMBULE **1**

CHAPITRE 1. LES SYSTEMES DE PROTECTION CONTRE LES AVALANCHES DE NEIGE **5**

1.1 Introduction générale sur les systèmes de protection **7**
1.1.1 Les protections actives permanentes 7
1.1.1.1 Les travaux modifiant la surface du sol 7
1.1.1.2 Les ouvrages agissant sur la répartition de la neige 8
1.1.1.3 Les ouvrages retenant la neige 9
1.1.2 Les protections actives temporaires 10
1.1.3 Les protections passives permanentes 11
1.1.3.1 Ouvrages de déviation 11
1.1.3.2 Ouvrage de freinage et d'arrêt 12
1.1.4 Les protections passives temporaires 13

1.2 Définition de l'action par l'expert neige **14**
1.2.1 Données naturelles intervenant sur la structure de galerie 14
1.2.1.1 Environnement, caractéristiques du sol 14
1.2.1.2 Evaluation de la topographie et des données géométriques et initiales à la section de référence 14
1.2.2 Mode de calcul des pressions de déviation dû à l'avalanche de neige sur la structure 16
1.2.3 Actions dues à la neige et aux avalanches à retenir pour le calcul des galeries paravalanches 17
1.2.3.1 Cas normal 18
1.2.3.2 Cas accidentel 18
1.2.4 Synthèse 18

CHAPITRE 2. DYNAMIQUE DES AVALANCHES DE NEIGE ET DES ECOULEMENTS GRANULAIRES **21**

2.1 Introduction générale sur les avalanches de neige **23**
2.1.1 Introduction 23
2.1.2 Définition et cause d'une avalanche de neige 23
2.1.3 Classification des avalanches 23
2.1.4 Paramètres physiques d'une avalanche 25
2.1.4.1 Masse volumique 26
2.1.4.2 Hauteur 26
2.1.4.3 Vitesse 26
2.1.4.4 Frictions 26

2.2 Dynamique des avalanches de neige **28**
2.2.1 Introduction 28
2.2.2 Modèles dynamiques d'avalanche de neige coulante (ou dense) 28

2.2.2.1 Approximation du bloc glissant 28
2.2.2.2 Déplacement en bloc déformable 35
2.2.3 Bilan sur les modèles 41

2.3 Dynamique des écoulements granulaires non-cohésifs 43
2.3.1 Introduction générale 43
2.3.2 Régimes d'écoulement granulaire 43
2.3.2.1 Régime quasi-statique 43
2.3.2.2 Régime rapide et dilué 44
2.3.2.3 Régime dense 44
2.3.3 Bilan sur la dynamique des écoulements granulaire 51

CHAPITRE 3. MISE AU POINT DES EXPERIMENTATIONS 55

3.1 Introduction générale 57

3.2 Expérimentation sur les écoulements granulaires dans un canal incliné 59
3.2.1 Développement de l'expérimentation 59
3.2.1.1 Dimensionnement du canal 59
3.2.1.2 Système de transfert des billes et système d'ouverture 61
3.2.1.3 Matériau granulaire utilisé 62
3.2.1.4 Rugosité 63
3.2.1.5 Paramètres ajustables 63
3.2.1.6 Grandeurs physiques à mesurer 64
3.2.2 Mise au point de la mesure des grandeurs physiques 65
3.2.2.1 Hauteur de l'écoulement 65
3.2.2.2 Profil de vitesse 67
3.2.2.3 Densité apparente de l'écoulement 77
3.2.2.4 Mesure des forces 82

3.3 Expérimentation sur les avalanches de neige réelles au col du Lautaret 87
3.3.1 Introduction 87
3.3.2 Introduction du site du Lautaret 87
3.3.3 Développement de la plaque-capteur 89
3.3.3.1 Conception 89
3.3.3.2 Dimensionnement 90
3.3.3.3 Installation de la plaque-capteur 93
3.3.3.4 Acquisition 95

3.4 Conclusion générale 96

CHAPITRE 4. ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX 99

Introduction générale 101

4.1 Résultats de l'expérimentation au col du Lautaret 101
4.1.1 Liste des tests issus des déclenchements et caractéristiques des avalanches de neige mesurées 101
4.1.2 Pressions normales et tangentielles exercées par l'avalanche sur le capteur 103
4.1.2.1 Saison hivernale 2005-2006 103
4.1.2.2 Saison hivernale 2006-2007 106

4.1.3 Application de la formule de calcul des pressions normales et tangentielles 107
4.1.1.4 Calcul d'incertitude 109
Conclusion 110

4.2 Résultats des expérimentations sur les écoulements granulaires dans un canal incliné 112
4.2.1 Introduction 112
4.2.2 Caractéristiques des écoulements en fonction des ouvertures initiales 112
4.2.2.1 Hauteur 112
4.2.2.2 Profil de vitesse et températures granulaires 117
4.2.2.3 Profil de densité 123
4.2.3 Evolution temporelle et spatiale des sollicitations exercées par différents écoulements sur le canal inférieur 126
4.2.3.1 Ecoulements avec une ouverture initiale de 20 cm 126
4.2.3.2 Ecoulements avec une ouverture initiale de 10 cm 128
4.2.4 Vérification de la méthode de calcul des pressions 130
4.2.4.1 Méthode générale 130
4.2.4.2 Méthode ajustée 131
Conclusion 133

CHAPITRE 5. MODELISATION D'UNE STRUCTURE DE GALERIE PARAVALANCHE. 137

5.1 Introduction 139

5.2 Principes de la simulation 139
5.2.1 Outil de simulation Fedeaslab 139
5.2.2 Elément poutre multifibre de type Timoshenko 140
5.2.3 Comportement du béton (Modèle de La Borderie) 140
5.2.4 Comportement de l'acier (Modèle Menegotto-Pinto) 142
5.2.5 Propriétés des matériaux utilisés 145

5.3 Modélisation de la structure sous différents chargements 145
5.3.1 Modèle de la modélisation utilisé pour le calcul EF 145
5.3.1.1 Géométrie 145
5.3.1.2 Conditions aux limites 146
5.3.2 Sollicitations dues à des avalanches réelles 148
5.3.3 Simulations statiques 152
5.3.4 Comparaison 153

5.4 Conclusion 153

BIBLIOGRAPHIE 161

ANNEXE 167

Liste de figures

Figure 1.1 Travaux modifiant la surface du sol : a. Banquettes étroites (reboisement) (Cemagref) b. Purge de rochers instables..... 7
Figure1.2 Ouvrages agissant sur la répartition de la neige : a. Barrière à neige. b. Panneau virevent (Cemagref). 8
Figure1.3 Ouvrages agissant sur la répartition de la neige : a. Snowgrippers en groupe [www.geo.fr] b. Snowgripper [www.snowgripper.at]. 9
Figure1.4 Ouvrages retenant la neige : a. Râteliers (Photo par F. Rapin, Cemagref) b. Filets (Photo par F. Valla, Cemagref). 9
Figure1.5 Protections actives temporaires : a. Déclenchement manuel (grenade à la main). b. Gazex c. Avalancheur d. Avalhex e. Catex. (Cemagref). 11
Figure1.6 Ouvrages de déviation : a. Galerie paravalanche (photo par F.Rapin, Cemagref) b. Tunnel (Iseran). 12
Figure 1.7 Ouvrages de déviation : a. Eglise de Vallorcine et sa tourne (photo par M.Givry Cemagref) b. Etrave protégeant une bergerie (Bessans, Savoie). 12
Figure 1.8 Ouvrages de freinage et d'arrêt : a. Dents déflecteurs (photo par F.Valla) b. Digue en béton armé empêchant le débordement latéral de l'avalanche (photo par F.Rapin). c. Plage de réception de Taconnaz (Haute- Savoie)..... 13
Figure 1.9 Schéma simplifié du profil transversal de la galerie paravalanche..... 15
Figure 1.10 Schéma simplifié d'un jet d'eau de section s frappant une plaque plane inclinée fixe..... 16
Figure 2.1 Classification selon la cohésion de la neige : a. Avalanche de plaque dure b. Avalanche de plaque friable..... 24
Figure 2.2 Classification générale : a. Avalanche coulante ou avalanche dense (photo par Cemagref) b. Avalanche en aérosol. 25
Figure 2.3 Classification générale : Avalanche mixte (photo originale)..... 25
Figure 2.4 Coefficient de friction μ : a. Valeurs déduites à partir du volume de l'avalanche [Ancey 2006]. b. Mesures expérimentales [Platzer 2006]. 27
Figure 2.5 Schéma simplifié d'un bloc glissant sur un profil bidimensionnel curviligne. 29
Figure 2.6 Définition du point de décélération P et du tronçon AP. 34
Figure 2.7 Une masse de matériau granulaire se déplace sur un sol rigide incurvé..... 39
Figure 2.8 Discrétisation d'une masse de matériau granulaire avec la méthode Lagrangienne. 40
Figure 2.9 Résumé des modèles dynamiques des avalanches de neige. 42
Figure 2.10 Trois états d'un matériau granulaire [Pouliquen 2001]. 43
Figure 2.11 Six configurations d'écoulement dense et leurs profils de vitesse correspondants. 45
Figure 2.12 Diagramme h_{stop} et h_{start} : a. Diagramme de phase tiré de [Pouliquen1999]. b. Les courbes retrouvées par [Daerr 2000]. 47
Figure 2.13 a. Nombre de Froude en fonction de h / h_{stop} pour différentes inclinaisons. b. Nombre de Froude en fonction de h / h_{stop} [Pouliquen 1999a]..... 48
Figure 2.14 Résumé des régimes et des modèles dynamiques d'écoulement granulaire..... 52
Figure 3.1 Vitesse et coefficient de frottement dynamique en fonction du temps cités par [Cazie 2003]. 58
Figure 3.2 Schéma simplifié du dispositif expérimental..... 60
Figure 3.3 Schéma simplifié de la section du canal supérieur 60

Figure 3.4 Schéma simplifié de la section du canal inférieur. 61
Figure 3.5 Système de transfert des billes : a. Trémie et canal supérieur b. Bac de récupération. 62
Figure 3.6 Courbe Granulométrique des billes de verre. 63
Figure 3.7 Schéma simplifié des paramètres ajustables. 64
Figure 3.8 Schéma simplifié de l'installation typique des méthodes de mesure des grandeurs physiques. 65
Figure 3.9 Décalage du faisceau laser en cas de rencontre d'un objet. 66
Figure 3.10 Principe de mesure de la hauteur de l'écoulement. 67
Figure 3.11 Schéma simplifié de la méthode PIV extrait du [Site ONERA]. 68
Figure 3.12 Méthode d'auto corrélation. 69
Figure 3.13 Méthode d'inter corrélation. 70
Figure 3.14 Courant alternatif. 71
Figure 3.15 Variation du niveau de gris des images en statique, éclairées avec une source lumineuse alimentée en courant alternatif. 72
Figure 3.16 Variation du niveau de gris des images en statique, éclairées avec une source lumineuse alimentée en courant continu. 72
Figure 3.17 Différentes résolutions d'image à différentes fréquences d'acquisition (images à l'échelle, éloignements de la caméra différents). 73
Figure 3.18 Procédure du calcul PIV sous WIMA. 75
Figure 3.19 Exemple du calcul du profil de vitesse (essai avec une ouverture initiale de 10 cm). 76
Figure 3.20 Traitement du reflet des billes. 76
Figure 3.21 Calcul du profil de niveau de gris. 77
Figure 3.22 Profil de niveaux de gris au cours du temps : Assemblage de l'ensemble des images d'une avalanche à une position donnée. 78
Figure 3.23 Profil de niveaux de gris converti en échelle de couleur. 78
Figure 3.24 Conditions initiales de l'étalonnage de la masse volumique apparente. 79
Figure 3.25 Schéma simplifié de la fluidisation. 80
Figure 3.26 Expérimentation en fluidisation et montage de mesure. 80
Figure 3.27. Loi d'étalonnage : Rapport entre le niveau de gris relatif et la porosité. 81
Figure 3.28 Répartition du niveau de gris relatif sur une image blanche éclairée : a. Niveau de gris non corrigé. b. Niveau de gris corrigé. 82
Figure 3.29 Installation du capteur dans la boite. 83
Figure 3.30 a. Schéma simplifié du montage du capteur à jauge b. Photo du capteur à jauge. 84
Figure 3.31 Section de la poutre. 84
Figure 3.32 Déformations des jauges sous charge et décharge verticales (en cas de compression propre). 85
Figure 3.33 Déformations des jauges sous chargement horizontal (cas de flexion simple). ... 85
Figure 3.34 Site expérimental du col du Lautaret : (a). Face sud-est de la crête de Chaillol (b). Face Nord-est de la crête de Chaillol (c). Couloir 2 proche de la route du Galibier (d). La structure du tripode dans la neige avant le déclenchement d'avalanche (e). Installation de la plaque dans le couloir 1. (f). Ensemble de la structure fusible. (g). Structure de la plaque dans la neige avant le déclenchement de l'avalanche. 88
Figure 3.35 Schéma simplifié de la structure du système de mesure de la plaque-capteur. 90
Figure 3.36 Schéma simplifié de la topographie autour de la route du Galibier dans l'axe du couloir n°2. 92
Figure 3.37 Installation de la plaque-capteur sur place : a). Bâti supérieur b). Bâti inférieur avec cinq capteurs de force c). Ensemble de la balance d). Capteurs de force installés

dans la direction verticale et horizontale. e). Jupe de protection f). Pattes de fixation g). Fixation de la plaque h). Finalisation. 94
Figure 3.38 Méthode de mesure la masse volumique en statique : extraction de la neige avec un tube. La masse de la neige de l'échantillon divisée par le volume du tube est la masse volumique (CEMAGREF). 95
Figure 4.1 Capteurs en parallèle à partir de la saison hivernale 2006-2007. 103
Figure 4.2 Pressions normales et tangentielles de l'avalanche déclenchée le 21 février 2006. 104
Figure 4.3 Avalanche déclenchée au 7 mars 2006 : a. Pressions normales et tangentielles b. Ratio. 104
Figure 4.4 Avalanche déclenchée au 14 mars 2006 : a. Pressions normales et tangentielles b. Ratio. 105
Figure 4.5 Schéma simplifié de la butée en amont du capteur. 105
Figure 4.6 Avalanche du 15 février 2007. 106
Figure 4.7 Avalanche du 27 février 2007. 107
Figure 4.8 Niveau de gris en fonction du temps à la position de mesure en amont du canal de l'écoulement avec une ouverture initiale à 20 cm. 112
Figure 4.9 Hauteurs d'écoulements mesurées en amont de la rupture pour 4 essais avec une ouverture initiale de 20 cm. 113
Figure 4.10 Hauteurs d'écoulements mesurées à la position du capteur après la rupture de pente pour 4 essais avec une ouverture initiale de 20 cm. 114
Figure 4.11 Niveau de gris en fonction du temps à la position de mesure en amont du canal de l'écoulement avec une ouverture initiale à 20 cm. 114
Figure 4.12 Hauteurs d'écoulements mesurées en amont du canal pour 4 essais avec une ouverture initiale de 15 cm. 115
Figure 4.13 Hauteurs d'écoulements mesurées à la position du capteur après la rupture de pente. 115
Figure 4.14 Niveau de gris en fonction du temps à la position de mesure en amont du canal de l'écoulement avec une ouverture initiale à 20 cm. 116
Figure 4.15 Hauteurs d'écoulements mesurées 50 cm avant la rupture de pente avec une ouverture initiale de 10 cm. 116
Figure 4.16 Hauteurs d'écoulements mesurées à la position du capteur après la rupture de pente. 116
Figure 4.17 Profil d'écoulement avalancheux constitué de trois couches différentes [Platzer 2006]. 118
Figure 4.18 Front de l'écoulement (2 s après l'ouverture de la porte) a. Profil de vitesse de l'écoulement. b. Profil de température granulaire (essai du 12 juin 2007). 119
Figure 4.19 a. Régime permanent (4s après l'ouverture de la porte) : a. Profil de vitesse de l'écoulement. b. Profil de température granulaire. 119
Figure 4.20 Mesure expérimentale du profil de vitesse de l'écoulement de neige en canal [Kern et al. 2004]. 120
Figure 4.21 Profils de vitesse en aval du canal à différentes positions de mesure : a. à t= 2,12 s b. à t= 4,12 s par rapport au temps initial. 121
Figure 4.22 Ecoulement avec une ouverture initiale à 10 cm : a. Profil de vitesse à t= 3 s. b. Profil de température granulaire à t= 3 s. 121
Figure 4.23 Ecoulement avec une ouverture initiale à 10 cm : a. Profil de vitesse à t= 5 s. b. Profil de température granulaire à t= 5 s. 122
Figure 4.24 Profils de vitesse de l'écoulement avec une ouverture à 10 cm en aval du canal à différentes positions de mesure: a. A t= 3,12s b. A t= 5,12s par rapport au temps initial. 122

Figure 4.25 Profil de vitesse et profil de température granulaire obtenus avec différentes tailles de maille..... 123
Figure 4.26 Profil de densité pour les écoulements avec une ouverture initiale à 20 cm : a. t=2s. b. t=4s. 124
Figure 4.27 a. Profil de densité à t=3s. b. Profil de densité à t=5s. 125
Figure 4.28 Pression tangentielle en fonction du temps aux différentes positions en aval du canal. 126
Figure 4.29 Pression tangentielle en fonction du temps aux différentes positions en aval du canal. 127
Figure 4.30 Ratio moyen pt/pn de l'écoulement : a. A la rupture de pente. b. A la position 5 cm en aval. c. La position 15 cm en aval. d. La position 25 cm en aval. 128
Figure 4.31 Pression normale en fonction du temps aux différentes positions en aval du canal. 129
Figure 4.32 Pression tangentielle en fonction du temps aux différentes positions en aval du canal. 129
Figure 4.33 Ratio moyen entre la pression tangentielle et normale à chaque position de mesure pour trois types d'écoulement. 130
Figure 4.34 Comparaison des pressions calculées et mesurées pour les écoulements avec une ouverture à 20 cm au temps t=2 s et t= 4 s : a. Pression normale b. Pression tangentielle. 133
Figure 4.35 Comparaison des pressions calculées et mesurées pour les écoulements avec une ouverture à 10 cm au temps t=3 s et t= 5 s: a. Pression normale b. Pression tangentielle. 133
Figure 5.1 Structure du fonctionnement de Fedeaslab. 139
Figure 5.2 Description d'une modélisation d'un élément poutre multifibre. 140
Figure 5.3 Réponses uniaxiales de contraintes-déformations du modèle d'endommagement du béton sous chargements cycliques..... 142
Figure 5.4 Courbe de Giuffré. 143
Figure 5.5 Comportement sous chargement cyclique [Guedes et al.1994]..... 144
Figure 5.6 Schéma simplifié de l'ensemble de la structure..... 146
Figure 5.7 Schéma simplifié du modèle de la simulation. 147
Figure 5.8 Relation entre la flèche au milieu de la dalle et le nombre de nœuds utilisé : a. Calcul en statique linéaire. b. Calcul en statique non linéaire..... 148
Figure 5.9 Deux chargements typiques. 149
Figure 5.10 Forces nodales appliquées (issues du chargement obtenu avec l'avalanche du 14 mars 2006). 149
Figure 5.11 Effort normal en fonction du temps dans l'appui à gauche (en amont)..... 150
Figure 5.12 Efforts verticaux dans les appuis. a. Appui en amont (articulation). b. Appui en aval (appui simple). 151
Figure 5.13 Réponses au milieu de la poutre-dalle. a. Variation temporelle du déplacement maximal b. Variation temporelle du coefficient D_1 au milieu de la partie base de la poutre-dalle..... 151
Figure 5.14 Valeur du coefficient d'endommagement en traction dans la poutre-dalle à t=2 s. 152
Figure 5.15 Distribution de l'endommagement du béton en calcul statique..... 152
Figure 5.16 Distribution de l'endommagement en traction du béton pour le calcul statique_2. 153

Liste de tableaux

Tableau 1.1 Formules de calcul des actions statiques et dynamiques d'avalanches [Ofrou/cff 2007]. 18
Tableau 2.1 Ordre grandeur des vitesses des avalanches de neige (m/s). 26
Tableau 2.2 Coefficients de turbulence empiriques. 31
Tableau 2.3 Valeurs de ξ pour différentes conditions topographiques. 34
Tableau 2.4 Valeurs de μ sous différentes conditions topographiques. 35
Tableau 3.1 Distribution de la taille des billes. 63
Tableau 3.2 Estimation des pressions dynamiques sur la plaque. 92
Tableau 4.1 Caractéristiques des avalanches dans le couloir 2 pendant les deux saisons hivernales. 102
Tableau 4.2 Type des cinq avalanches de neiges. 102
Tableau 4.3 Comparaison des pressions mesurées et calculées de cinq avalanches de neige. 108
Tableau 4.4 Estimation de l'épaisseur de la partie dense de l'avalanche et vérification du coefficient de friction. 109
Tableau 4.5 Comparaison entre hauteurs de la couche dense calculées et hauteurs de la couche de saltation mesurées. 109
Tableau 4.6 Erreur absolue sur la pression normale calculée d'après les mesures de grandeurs physiques. 110
Tableau 4.7 Masse volumique moyenne sur la hauteur de l'écoulement en aval de la rupture. 124
Tableau 4.8 Masse volumique moyennée dans la hauteur de l'écoulement en aval de la rupture. 125
Tableau 4.9 Pressions tangentielles et normales moyennées dans le régime permanent les ratios correspondants. 129
Tableau 4.10 Valeurs moyennes des caractéristiques pour les écoulements avec une ouverture initiale à 20 et 10 cm en amont du canal. 130
Tableau 4.11 Comparaison des pressions calculées et mesurées pour les écoulements avec une ouverture à 20 cm et à 10 cm. 131
Tableau 4.12 Comparaison des pressions calculées et mesurées avec la méthode ajustée. 132
Tableau 5.1 Valeurs de paramètres du modèle de La Borderie [La Borderie 1991]. 142
Tableau 5.2 Propriétés des matériaux. 145
Tableau 5.3. Aciers dans chaque section. 147
Tableau 5.4 Influence de la taille d'élément. 148
Tableau 5.5 Premières quatre fréquences propres. 149
Tableau 5.6 Fréquences propres des modèles de la galerie paravalanche de Montaulever [Martinez Granados 2007]. 150
Tableau 5.7 Réponses de la structure sous chargements statiques. 152
Tableau 5.8 Comparaison des résultats calculés avec le chargement statique et dynamique. 153

Préambule

Problématique

Les avalanches de neige sont des risques naturels majeurs des régions montagneuses. Avant l'apparition de l'industrie du ski au début du vingtième siècle, les paysans montagnards étaient les victimes directes et uniques de cette menace. Après la deuxième guerre mondiale, avec la forte croissance économique, les activités d'hiver ont été beaucoup développées. Les régions montagneuses sont alors devenues très attractives et touristiques et les risques naturels ne concernèrent plus uniquement les quelques habitants montagnards mais des millions de touristes et leurs activités. Les avalanches de neige peuvent devenir très destructives et interrompre la circulation de quelques heures à plusieurs jours. Ces risques deviennent de moins en moins acceptables, d'une part du fait des pertes en vies humaines bien sûr, mais d'autre part aussi aux dégâts économiques (coupures de grands axes de circulation et fermetures des routes d'accès à une station de sports d'hiver). La protection des routes contre l'avalanche de neige est donc importante et indispensable. De nombreuses solutions de protection ont été développées. Actuellement, les méthodes de reboisement sur banquette, le déclenchement artificiel des avalanches, les structures comme les râteliers et filets paravalanches, les murs déflecteurs et les galeries paravalanche sont très utilisés. Parmi ces différents ouvrages de protection, les ouvrages de type galeries paravalanches sont relativement performants mais ils sont aussi coûteux. Le prix actuel est d'environs 30,000 euros par mètre linéaire et les ouvrages font de quelques mètres à quelques centaines de mètres de long pour les cas extrêmes. Ainsi le prix total peut être considérable. Ces ouvrages sont pourtant dimensionnés avec des méthodes très simplifiées et empiriques. Malgré leurs performances par rapport aux autres types de protection, le niveau de protection des galeries paravalanches est difficilement quantifiable. La principale raison de cette difficulté vient de la méconnaissance des sollicitations exercées par l'avalanche de neige sur l'ouvrage.

Si l'avalanche est un objet d'étude pour les chercheurs, l'interaction avec un obstacle n'est que très rarement traitée du point de vue ouvrage. De plus, les caractéristiques de la neige sont souvent mal maîtrisées à cause de leurs sensibilités aux conditions météorologiques. Les grandeurs physiques de l'avalanche comme la vitesse, l'épaisseur et la densité sont difficiles à évaluer au sein même de l'écoulement. Les phénomènes d'interaction entre l'écoulement et la structure sont donc très complexes.

Motivation du travail

Le but de ce travail est d'une part d'essayer de connaître la répartition spatiale et temporelle des sollicitations normales et tangentielles de l'avalanche de neige sur une structure de type galerie paravalanche, et d'autre part de vérifier les méthodes de calcul des sollicitations et de dimensionnement de la structure mise en œuvre par les ingénieurs. Enfin les réponses de la structure sous différents chargements seront abordées.

Plan de thèse

Dans le premier chapitre nous aborderons le thème des structures de protection. Nous allons décrire la majorité des ouvrages de protection actuels et leurs avantages et inconvénients. Puis nous allons présenter précisément les méthodes d'ingénierie de calcul des sollicitations des avalanches de neige sur les galeries paravalanches et les méthodes de dimensionnement de ces structures.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter d'abord les différents types d'avalanches de neige et leurs caractéristiques. Nous allons faire ensuite un bilan des modèles dynamiques des avalanches de neiges existants. Du fait du faible nombre d'expériences sur avalanche réelles qui ont pu être menées, nous avons aussi effectué des études en laboratoire sur des matériaux granulaires d'où la théorie également abordée dans ce chapitre. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux modèles dynamiques d'écoulements granulaires sur un plan incliné.

Le troisième chapitre sera consacré à la mise au point de deux expérimentations. La première expérimentation concerne la mesure des efforts normaux et tangentiels des avalanches de neige réelles. Les mesures ont été réalisées sur le site du col de Lautaret, à l'aide d'une plaque instrumentée de capteurs de forces dans l'un des couloirs équipés de dispositifs de déclenchement de ce site. La deuxième expérimentation est un modèle réduit d'écoulement granulaire dans un canal incliné. Les méthodes de mesure des grandeurs physiques de l'écoulement granulaire seront présentées.

Au chapitre quatre, nous analyserons l'ensemble des résultats expérimentaux des essais présentés au chapitre III. Une vérification des méthodes d'ingénierie sera présentée.

Dans le dernier chapitre nous allons modéliser la structure de galerie paravalanche avec une méthode des éléments finis simplifiée. Les réponses de la structure sous chargement des sollicitations avalancheuses seront analysées. Les dangers potentiels (changement de la topographie et rupture du sol latéral) par rapport à la structure seront enfin présentés.

Chapitre 1. Les systèmes de protection contre les avalanches de neige

1.1 Introduction générale sur les systèmes de protection

Les premières actions de défense organisées contre les avalanches de neige semblent remonter au 18ème siècle en France et en Suisse [Ancey 2005]. Ces défenses de type passif consistaient essentiellement à renforcer les murs des habitations les plus exposés aux avalanches. La défense raisonnée contre les avalanches a débuté au 19ème siècle. Cette défense consistait en des observations des paramètres favorisant l'apparition des avalanches et en un reboisement actif des zones exposées à ce phénomène. Il est intéressant de noter que malgré l'ancienneté de ces protections, celles ci sont toujours pertinentes à l'heure actuelle. La troisième évolution (construction d'ouvrages de protection) datant de l'après deuxième guerre mondiale est liée au développement des capacités techniques du génie civil. Actuellement, il existe de nombreux types de protection contre les avalanches de neige. Selon leurs modes d'action, ils peuvent être classés en quatre catégories : les protections actives permanentes, les protections actives temporaires, les protections passives permanentes, les protections passives temporaires.

1.1.1 Les protections actives permanentes

L'objet des protections actives permanentes est de fixer et de stabiliser le manteau neigeux dans la zone de départ. Ce type de protections est souvent appliqué dans les fortes pentes, entre 30° et 45°. Les surfaces traitées peuvent être très larges, car les zones de départ sont parfois très étendues. Plusieurs techniques peuvent être dénombrées. Soit ces techniques modifient la surface du sol, soit elles agissent sur la répartition de la neige grâce à l'action du vent, ou encore elles fixent le manteau neigeux avec les ouvrages.

1.1.1.1 Les travaux modifiant la surface du sol

La rugosité du sol est un facteur favorable pour maintenir le manteau neigeux. L'augmentation de la rugosité du sol peut permettre de réduire le risque de déclenchement d'avalanche. La méthode la plus courante concerne le reboisement sur banquettes étroites (figure 1.1 a). Le creusement de banquettes étroites est nécessaire pour éviter que les jeunes arbres ne soient endommagés par la reptation de la neige. De plus, le remodelage du sol, la modification du profil de terrain ou la purge de rochers instables sont souvent associés à ces travaux.

Figure 1.1 Travaux modifiant la surface du sol : a. Banquettes étroites (reboisement) (Cemagref) b. Purge de rochers instables.

1.1.1.2 Les ouvrages agissant sur la répartition de la neige

L'action du vent est un élément important sur la constitution du manteau neigeux. Elle peut créer des surépaisseurs de neige et cette surcharge peut conduire à un déclenchement d'avalanche. Par contre, la force du vent peut être utilisée pour déplacer le dépôt de neige des zones pentues et dangereuses vers des zones qui le sont moins afin d'éviter le risque d'avalanche. Il existe plusieurs types d'ouvrage : barrière à neige, panneau virevent, toit buse et snowgripper.

La barrière à neige est l'ouvrage le plus utilisé. C'est souvent une barrière en métal ou en bois vertical à traverses horizontales de 4 à 5 mètres. Le système placé en face du vent apporte une forte perturbation à l'écoulement de l'air, ce qui permet de modifier les modes de dépôt. Son efficacité est excellente quand il est placé perpendiculairement au vent et moindre quand le vent souffle dans une autre direction.

Le panneau virevent est un panneau vertical de forme trapézoïdale souvent de plusieurs mètres de haut. Sa forme permet de créer un tourbillon qui érode localement le manteau neigeux, ce qui est comme un point d'ancrage sur l'ensemble du manteau neigeux.

Le toit buse est un système de panneaux inclinés à 45° qui agit comme un goulot d'étranglement. Il accélère localement la vitesse du vent et souffle la neige ou l'oblige à se déposer plus loin.

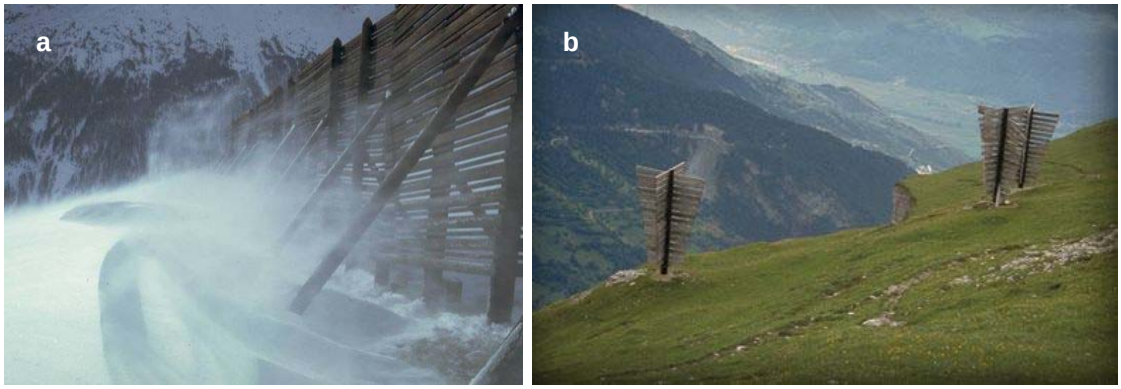


Figure1.2 Ouvrages agissant sur la répartition de la neige : a. Barrière à neige. b. Panneau virevent (Cemagref).

Le Snowgripper est une technologie développée en 2001-2002 par les autrichiens. Il s'agit d'un prisme en métal d'un mètre à un mètre cinquante de hauteur et d'un mètre de largeur et de profondeur. Il est destiné à installer un réseau maillé, avec un écartement le plus souvent de cinq mètres, conformément à la réglementation suisse. Le fonctionnement du Snowgripper est multiple. Mécaniquement, grâce à sa forme, il peut créer différentes zones de pressions auto-stables en modifiant la distribution spatiale des contraintes dans le manteau neigeux. Il peut également utiliser la force du vent pour amasser et comprimer ponctuellement la neige dans les espaces libres. Thermiquement, grâce à son matériau métallique conducteur de chaleur, l'hétérogénéité thermique dans le manteau neigeux peut être favorisée en modifiant le gradient de température, ce qui empêche la propagation d'une cassure.

Figure1.3 Ouvrages agissant sur la répartition de la neige : a. Snowgrippers en groupe [www.geo.fr] b. Snowgripper [www.snowgripper.at].

1.1.1.3 Les ouvrages retenant la neige

Les ouvrages pour fixer la neige sur place sont les plus classiques du génie paravalanche. Il existe deux catégories de structures de ce type d'ouvrage, la structure rigide (râteliers et claies) et la structure souple (filets).

Le râtelier est un tablier en bois ou en métal à traverses placé perpendiculairement au sol. C'est l'ouvrage plus utilisé en France. Les râteliers sont souvent installés en ligne continue sur une long distance, l'investissement est important (1000 €/mètre soit environs 300,000 € pour traiter un hectare). Dans le cas de fortes accumulations de neige, les râteliers peuvent être saturés et perdre leur efficacité.

La claie est le même type d'ouvrage que le râtelier mais le tablier est formé de traverses horizontales. Il est plus utilisé en Suisse et en Italie.

Le filet est utilisé dans le cas d'un sol très compact et où les structures rigides sont difficilement applicables. Il est moins coûteux que les structures rigides (600 €/mètre) et facile à réparer. Par contre, il est réputé moins bien retenir la neige récente.

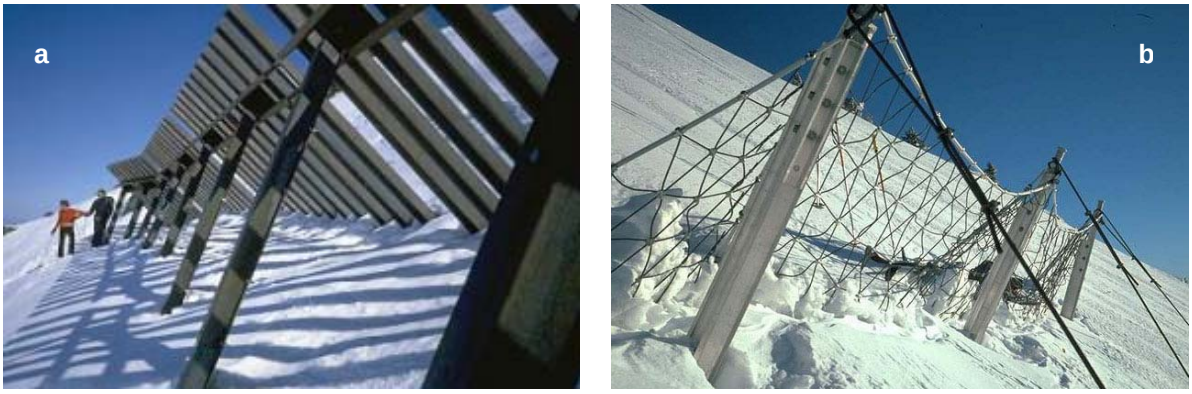


Figure1.4 Ouvrages retenant la neige : a. Râteliers (Photo par F. Rapin, Cemagref) b. Filets (Photo par F. Valla, Cemagref).

1.1.2 Les protections actives temporaires

L'objectif des protections actives temporaires est de déclencher de petites avalanches dès qu'une quantité de neige suffisante est tombée afin de supprimer le danger latent. Généralement, les déclenchements artificiels sont provoqués par une explosion au-dessus du manteau neigeux. L'onde de choc due à l'explosion peut casser la plaque de neige, rompre les ancrages, briser les dendrites des cristaux de neige et enfin conduire à déclencher une avalanche. Ces techniques sont souvent utilisées pour sécuriser les routes et les domaines skiables et elles sont sévèrement réglementées. Toutes les opérations doivent être effectuées dans le cadre d'un Plan d'Intervention pour le Déclenchement des Avalanches (PIDA) qui précise les secteurs des tirs préventifs, la procédure utilisée, les itinéraires à suivre, les zones interdites, les intervenants et les consignes de tirs. En France, elles ne doivent pas être mises en œuvre au-dessus de zones habitées. Les différentes techniques explosives sont le déclenchement manuel (grenade à main), le déclenchement à distance (avalancheur), et les Catex, Gazex, Avalhex etc. (Explosions contrôlées).

Le déclenchement manuel est réalisé par des charges explosives à main jetées par l'intermédiaire d'une cordelette dans la pente. L'utilisation de cette méthode est simple et son coût est moindre. Mais son application n'est pas toujours possible à causes des mauvaises conditions de pente. La sécurité n'est d'ailleurs pas toujours garantie.

L'avalancheur est un lanceur pneumatique qui propulse une charge explosive et provoque un déclenchement à distance. La charge explosive est une flèche d'environs 1,8 mètre de long contenant un explosif liquide de 2 kg et il explose au moment de l'impact sur la neige. La portée peut atteindre 2000 mètres pour une dénivellation de 600 mètres. C'est une méthode assez coûteuse, 35,000 € pour le lanceur et 200 € pour chaque tir.

Le Catex est un système constitué d'un câble auquel une ou plusieurs charges explosives sont accrochées. La charge (ou les charges) explosive peut se déplacer de la même manière qu'un téléphérique le long du câble, ce qui permet de faire varier le poste de tir au-dessus du manteau neigeux à une certaine distance qui dépasse parfois dix kilomètres. C'est un investissement très cher (100,000 €/kilomètre) mais très efficace. Il est largement employé en France depuis une vingtaine année.
Le système Gazex est un exploseur à gaz. Il est constitué d'un tube où un mélange gazeux d'oxygène et de propane est enflammé et d'un abri où les gaz sont stockés. Le tube est incliné de 30° par rapport à la pente et ouvert vers l'extérieur (la partie externe est souvent appelée « dragon »). Depuis sa première apparition en 1988, plus de 1300 Gazex ont été installés dans le monde entier. La France reste le pays le plus équipé en la matière. C'est un système facile à mettre en œuvre et très efficace mais demandant un investissement important (centaines de milliers d'euros pour une centrale et quelques dragons).

L'Avalhex est un autre type d'exploseur à gaz. L'appareil provoque une explosion avec un ballon gonflé rempli d'hydrogène et d'oxygène au-dessus du manteau neigeux. Ce dispositif est mis en fonction depuis 2000 et son efficacité est moyenne.

Figure1.5 Protections actives temporaires : a. Déclenchement manuel (grenade à la main). b. Gazex c. Avalancheur d. Avalhex e. Catex. (Cemagref).

1.1.3 Les protections passives permanentes

Les protections passives permanentes sont historiquement les plus anciennes techniques contre les avalanches. L'idée est de protéger les habitats, les monuments et les routes principales. Il s'agit majoritairement d'ouvrages de génie civil. Certains sont des ouvrages de déviation tels que les galeries, les tunnels, les tournes et les étraves. D'autres sont des ouvrages de freinage comme les tas, les dents, ou des ouvrages d'arrêt incluant les murs, les digues et les plages de dépôt. En outre, il existe des auto-protections de type renforcements et aveuglements.

1.1.3.1 Ouvrages de déviation

La galerie paravalanche est un ouvrage formant un tremplin au-dessus de la voie d'accès. Le toit de la galerie fait un angle important avec le versant de l'avalanche, ce qui permet à la fois de laisser passer et de freiner l'avalanche. Par contre la déviation de pente peut conduire à un effet de choc et une expansion latérale de l'avalanche sur le toit. La longueur de galerie doit donc être supérieure à celle de la zone initialement balayée par l'avalanche, souvent comprise entre quelques mètres et quelques kilomètres. C'est une solution performante mais très onéreuse, environ 30,000 € par mètre linéaire d'ouvrage. Le prix total est donc considérable. Le tunnel a la même fonction que la galerie paravalanche, mais il est fermé latéralement.

Figure1.6 Ouvrages de déviation : a. Galerie paravalanche (photo par F.Rapin, Cemagref) b. Tunnel (Iseran).

La tourne est une protection très ancienne beaucoup utilisée par les villageois montagnards. Il s'agit d'une digue de déviation de quelques mètres de haut sur un des cotés des bâtiments à protéger, constituée d'une levée de terre ou d'un mur en maçonnerie. La digue peut détourner une avalanche dense et lui éviter d'impacter directement le bâtiment. C'est une bonne technique de protection assez peu coûteuse (environs 10 €/m). Mais l'angle de déviation doit être bien respecté.

L'étrave est un ouvrage massif en forme de coin placé juste en amont de la structure à protéger. Son principe est quasiment le même que celui de la tourne, mais il dévie l'avalanche sur deux cotés. C'est une protection efficace quand elle est suffisamment haute.

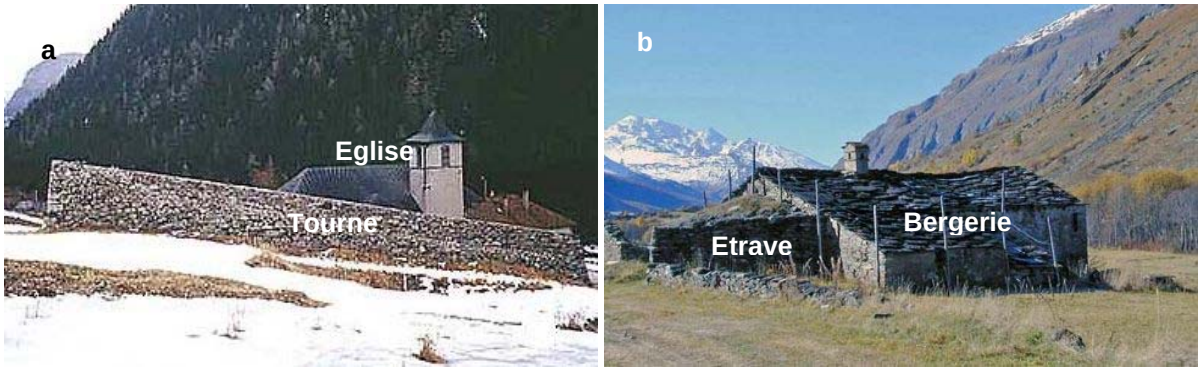


Figure 1.7 Ouvrages de déviation : a. Eglise de Vallorcine et sa tourne (photo par M.Givry Cemagref) b. Etrave protégeant une bergerie (Bessans, Savoie).

1.1.3.2 Ouvrage de freinage et d'arrêt

Les tas freineurs sont les buttes construites en terre, en maçonnerie ou en gabion, souvent disposés en réseaux pour ralentir les avalanches et les arrêter dans une zone de stockage. Quand la zone de stockage est comblée par une première avalanche, une deuxième peut passer au-dessus et endommager les constructions à protéger. Ce type de protection semble peu efficace. Malgré son faible investissement (10 €/m^3), il est peu utilisé.

Les dents freineuses ont la même fonction que les tas freineurs mais ils sont plus robustes mécaniquement. Ce sont des ouvrages pyramidaux en béton armé de plusieurs mètres de haut. Leur coût est assez élevé et leur efficacité encore assez mauvaise.

Les murs ou les digues sont des murs en pierre ou en terre intervenant pour stopper la fin de l'avalanche. Ce sont souvent des ouvrages complémentaires aux tas freineurs et aux dents freineuses. Le coût de ce type d'ouvrage n'est pas élevé mais la sécurité n'est ici aussi pas assurée.

La plage de dépôt est la dernière étape de protection, c'est un grand terrain peu abrupt pour freiner et stocker l'avalanche.

Figure 1.8 Ouvrages de freinage et d'arrêt : a. Dents déflecteurs (photo par F.Valla) b. Digue en béton armé empêchant le débordement latéral de l'avalanche (photo par F.Rapin). c. Plage de réception de Taconnaz (Haute- Savoie).

1.1.4 Les protections passives temporaires

La défense temporaire passive consiste quant à elle à prendre des mesures administratives d'évacuation et d'interdiction de circulation suite à des observations de conditions nivo-météorologiques défavorables. Elle s'organise autour de la réglementation et de l'avertissement et cherche simplement à atténuer les effets néfastes d'une éventuelle avalanche. Les méthodes utilisées sont souvent les panneaux routiers, les drapeaux dangers, ou le DRA (Détecteur Routier d'Avalanche). Le DRA est un système constitué de feux tricolores situés sur la route et reliés par radio à un émetteur positionné dans la zone de transit. Le passage d'avalanches devant l'émetteur déclenche le signal et les feux passent au rouge. C'est un dispositif réservé à des zones de faible fréquence d'avalanche.

1.2 Définition de l'action par l'expert neige

1.2.1 Données naturelles intervenant sur la structure de galerie

Les constructions des ouvrages de galerie paravalanche sont très particulières, car chaque cas est différent. Avant de dimensionner une galerie paravalanche, il est nécessaire de collecter et étudier les données naturelles intervenant dans le calcul. Ces données naturelles sont principalement les suivantes : l'environnement, les caractéristiques du sol, la topographie du site avalancheux, les données sur les avalanches de référence et les autres risques éventuels.

1.2.1.1 Environnement, caractéristiques du sol

L'insertion d'un ouvrage dans un site avalancheux nécessite l'étude de nombreux paramètres. Pour éviter une dégradation du site pendant la construction et des problèmes potentiels dans le long terme, une étude sur les conséquences du projet sur l'environnement actuel et dans le futur doit être impérativement faite par des spécialistes (étude d'impact).

La structure de galerie paravalanche est soumise généralement à la poussée de terrain (partie amont) et à l'interaction du sol (fondation). Les remblais à l'amont jouent un rôle important, car cette partie reçoit directement l'impact d'avalanche. Cet impact d'avalanche peut contribuer à une variation au cours du temps des caractéristiques du remblai et de sa géométrie. De plus, l'érosion due à l'eau et la neige peut modifier les caractéristiques mécaniques du remblai au fur et à mesure du temps. Cela entraîne des difficultés pour évaluer la poussée sur l'ouvrage. L'incertitude de ces paramètres peut avoir des effets très sensibles sur le calcul des efforts sur la galerie. La solution est de compacter suffisamment le remblais pour avoir une meilleure résistance et de maintenir sa géométrie pour éviter le changement de poussée. Mais un tel compactage n'est pas toujours possible du fait de la nature du matériau ou des difficultés d'accès.

1.2.1.2 Evaluation de la topographie et des données géométriques et initiales à la section de référence

Ce sont les spécialistes en avalanches qui évaluent les données initiales pour le site concerné. Il s'agit de la topographie du système avalancheux, des indications nivo-météorologiques, de la section de référence et des données initiales des avalanches de référence. Ils spécifient aussi le type d'avalanche à prendre en considération pour la détermination des actions.

Les données de la topographie du site sont les altitudes sommitales, l'exposition de versant (un facteur qui influence la qualité de neige), l'allure générale et la pente de la zone de départ et de la zone d'écoulement. Les indications nivo-météorologiques sont souvent des informations enregistrées (cumuls de neige fraîche observés en quelques jours, vitesse du vent, etc.) par les stations nivo-métérologiques proches du site.

La section de référence est choisie dans la pente en amont de la galerie. Une simplification de la section de référence (profil transversal de la galerie et du sol) est schématisée sur la figure 1.9. L'avalanche arrive du couloir naturel avec une vitesse V_0 et une épaisseur h_0 (définies par l'expert en avalanches), elle suit ensuite un changement de pente et parcourt une distance de déviation L. Cette distance de déviation est constituée de deux parties : la longueur du

remblai et la largeur de la couverture de la structure de galerie T. L'action de l'avalanche sur le toit de la galerie est décrite par les formules représentant l'impact d'un écoulement fluide à surface libre avec une surface solide inclinée. Les formules ne sont valables que pour un angle de déviation β relativement faible [CETE 1979]. Si β est grand, l'effet de choc est très important et les formules ne peuvent plus décrire le phénomène réel. De plus, si β est grand, le front d'avalanche va s'élargir considérablement après le changement de pente ce qui implique d'augmenter la longueur de la galerie pour éviter un recouvrement les deux entrées. Cependant, les faibles valeurs de β demandent une forte inclinaison du toit de la galerie, ce qui n'est pas toujours réalisable dans les cas réels. Généralement, les meilleurs choix d'angle β sont compris entre 15° et 25°. Le toit de galerie est normalement incliné vers l'aval d'un angle compris entre 10° et 20°. Les sollicitations dues à l'avalanche de neige sur la structure sont définies par P_n la pression normale et P_t la pression tangentielle.

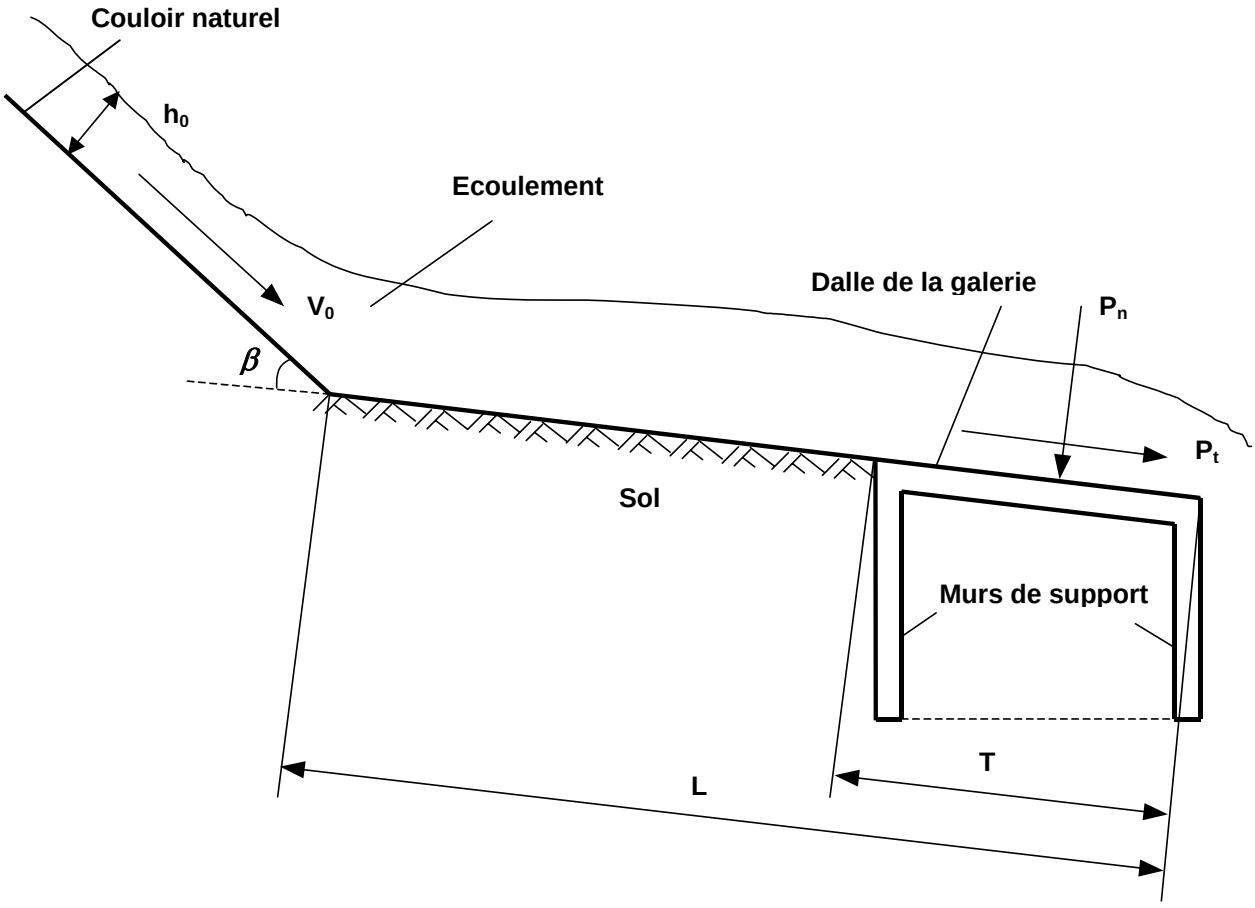


Figure 1.9 Schéma simplifié du profil transversal de la galerie paravalanche.

Les données des avalanches de référence sont la qualité (sèche, humide) et la masse volumique de la neige, des combinaisons entre la vitesse et l'épaisseur au niveau du front de l'avalanche, l'emprise de l'avalanche par rapport à la route et à l'ouvrage protégé, la possibilité d'accumuler un dépôt compact sur le toit de galerie, etc.

1.2.2 Mode de calcul des pressions de déviation dû à l'avalanche de neige sur la structure

Avant d'écrire les formules, nous rappelons le résultat du calcul de l'action d'un jet d'eau bidimensionnel horizontal s'écrasant sur une plaque inclinée fixe. L'eau a une vitesse initiale V_0 et une épaisseur h. La plaque est inclinée d'un angle α par rapport à l'axe du jet. D'après la conservation de quantité de mouvement, le résultant de force des pressions sur la plaque R peut être défini à partir de l'équation suivante :

$$R = \rho s V_0^2 \cos\alpha \qquad [\mathrm{N}] \tag{1.1}$$

s étant la section de jet et ρ la masse volumique de l'eau.

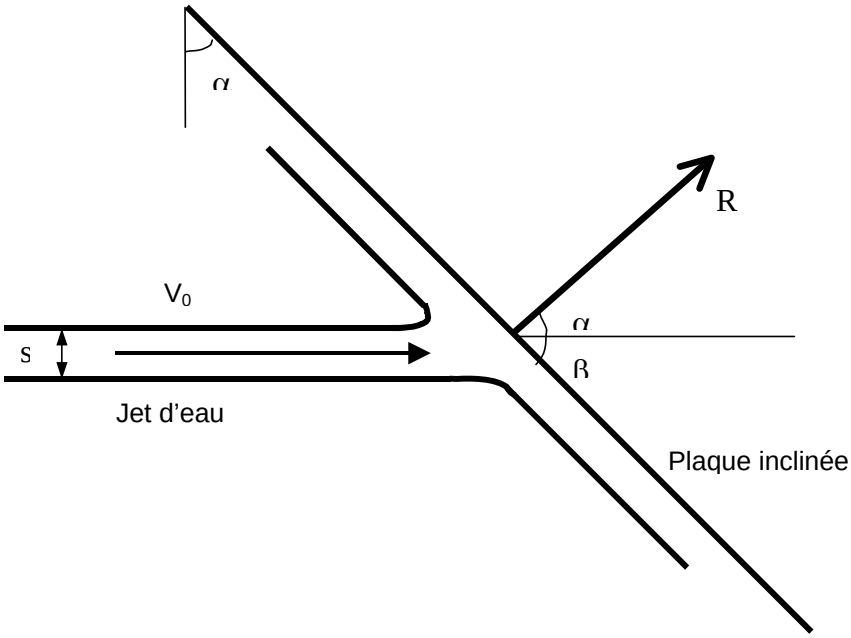


Figure 1.10 Schéma simplifié d'un jet d'eau de section s frappant une plaque plane inclinée fixe.

Pour le cas de galerie paravalanche, l'angle de déviation β correspond à 90°-α.. Le résultat de la pression normale peut donc s'exprimer :

$$p_n = \rho V_0^2 \frac{h_0}{L} \cos\alpha = \rho V_0^2 \frac{h_0}{L} \sin\beta \tag{1.2}$$

Les vitesses V_0 et hauteur h_0 sont déterminées en utilisant le modèle dynamique de Voellmy. C'est un modèle simple et le plus utilisé des modèles dynamiques d'avalanches. Il permet de déterminer la vitesse maximale des avalanches et leur distance d'arrêt. Nous allons présenter en détail dans le deuxième chapitre les modèles dynamiques principaux.

La pression tangentielle peut ensuite être définie en multipliant la pression normale par un coefficient de frottement empirique *c*. Selon les experts français, ce coefficient est compris

entre 0,2 et 0,4 [CETE 1979], [Rapin 2000]. Selon la nouvelle norme suisse, cette valeur est comprise entre 0,2 et 0,6 [Ofrou/cff 2007].

$$p_t = c \cdot p_n \tag{1.3}$$

1.2.3 Actions dues à la neige et aux avalanches à retenir pour le calcul des galeries paravalanches

Les actions à prendre en compte pour la structure sont de trois catégories : action permanente, action variable et action accidentelle. L'action permanente est constituée du poids propre de la structure et de la pression statique de la neige au repos. L'action variable ou accidentelle concerne les actions de déviation due à l'avalanche coulante.

Dans la réglementaire suisse, plusieurs situations types d'actions dues à la neige et aux avalanches sont listées [Ofrou/cff 2007]. Les cas les plus courants sont les suivants :
1. Avalanche coulante sur un terrain nu. Dans ce cas là, l'action de l'avalanche est constituée du poids propre de la neige en mouvement et des forces de déviation.
2. Avalanche coulante sur un toit enneigé. La couverture de la neige peut réduire l'angle de la déviation et diminuer la force de déviation. La réduction de l'angle de déviation est estimée par les experts en avalanches. Les actions dues à la couverture neigeuse (poids propre) et à l'avalanche coulante sont soit séparément prises comme action prépondérante, soit simultanément prises comme action concomitante.
3. Avalanche coulante par-dessus un dépôt d'avalanches. C'est un cas similaire au cas précédent.
4. Dépôt d'avalanches au repos. C'est souvent les cas dans les sites où les avalanches peuvent créer de gros dépôts. Il faut donc prendre en compte l'épaisseur du dépôt d'avalanche dans l'épaisseur de couverture totale.

Outre ces généraux, la réglementation a aussi listé d'autres exemples typiques :
1. Pression statique de neige contre le poteau aval de la galerie. C'est le cas où la neige couvre totalement la galerie et la pression statique contre le poteau aval est à prendre en compte comme une action indépendante.
2. Poussée d'avalanche contre le poteau aval de la galerie. Lorsque l'avalanche vient du versant opposé de la vallée, il faut prendre en compte les poussées contre le poteau aval de la galerie.
3. Pressions de rampement sur le toit de la galerie. Cette pression est prise en compte dans le cas de gros dépôt d'avalanches et de forte pente de versant.
4. Impact d'avalanche sur un toit de galerie. En présence d'un saut de l'avalanche par-dessus un arrêt ou lorsque l'angle de déviation est supérieur à 60°, l'effet d'impact dû à l'avalanche de neige est très important. Les forces de déviation calculées avec la formule 1.x ne sont plus représentatives.

En plus des actions du fait des avalanches, à cause de l'exigence d'aptitude au service, il faut aussi prendre en compte d'autres actions spécifiques aux conditions hivernales : glaçons, verglas, eau de fonte et saumure de déverglaçage, brouillard salin, reflux d'avalanche etc.

1.2.3.1 Cas normal

Le cas normal consiste à prendre la surcharge apportée par l'avalanche de neige comme une action variable. Selon la norme suisse SIA 260, pour le cas normal, les avalanches de référence sont celles dont l'intensité et l'étendue sont définies pour une période de retour de 30 ans. Des pressions tangentielles à l'intérieur des dépôts de neige ne sont pas à considérer (sauf pour les trois premiers cas typiques présentés dans la paragraphe précédente). Par contre, il faut prendre en compte la poussée des terres due aux dépôts de neige.

Le tableau 1.1 présente une synthèse des formules de calcul pour les actions d'avalanches. Les deux premières lignes sont les pressions statiques normales et tangentielles dues au poids propre de la neige. La troisième représente les pressions hydrostatiques, et la dernière représente les pressions dynamiques dues au changement de pente. Les termes d_s, d_A, d_L représentent les épaisseurs de la neige pour les différents cas. Dans la formule pour la force de déviation, la longueur de déviation L est remplacée par $6d_L$.

Action	Pression normale (Pa)	Pression tangentielle (Pa)
Couverture neigeuse naturelle	$p_{ns} = \rho g d_s \cos\theta$	$p_{ts} = p_{ns} \tan\theta$
Dépôt d'avalanche	$p_{nA} = \rho g d_A \cos\theta$	$p_{tA} = p_{nA} \tan\theta$
Avalanche coulante	$p_{nL} = \rho g d_L \cos\theta$	$p_{tL} = \mu p_{nL}$
Force de déviation	$p_n = \dfrac{\rho d_L V_L^2 \sin\beta}{6d_L}$	$p_t = \mu p_n$

Tableau 1.1 Formules de calcul des actions statiques et dynamiques d'avalanches [Ofrou/cff 2007].

1.2.3.2 Cas accidentel

Pour une avalanche de forte intensité et de grande étendue qui ne se produit que très rarement (période de retour de 300 ans) et qui est donc difficilement descriptible par les statistiques, les sollicitations dues à l'avalanche de neige sont considérées comme action accidentelle. Un tel événement implique le concours simultané de plusieurs facteurs indépendants les uns des autres pour son déclenchement.

1.2.4 Synthèse

Le dimensionnement de galeries paravalanches est semi-empirique, car la détermination des pressions exercées par l'avalanche sur la structure dépend de beaucoup de paramètres peu contrôlables. Les caractéristiques des avalanches sont soit calculées par des modèles dynamiques simplifiés, soit estimées à partir des bases de données de référence. Elles ne sont pas toujours représentatives. Le calcul des pressions est basé sur la théorie d'impact d'un fluide parfait sur une plaque inclinée. Cela pose au moins deux problèmes. Premièrement, l'avalanche de neige n'est pas un fluide parfait newtonien, son comportement d'impact peut être très différent de celui de l'eau. Deuxièmement, comme nous l'avons déjà présenté précédemment, pour appliquer cette théorie, il faut que l'angle de déviation soit faible. Cela ne peut pas toujours être respecté dans la réalité. De plus, la longueur du remblai qui supporte

le premier choc de l’avalanche risque d’évoluer dans le temps. Cette partie du sol à l’amont est essentielle et très importante pour la performance de la structure de la galerie. Un changement de géométrie peut modifier la répartition de charge de l’avalanche et mettre la structure en danger ou mener à une rupture du sol. Notre étude est donc basée sur les vérifications expérimentales de ces calculs et méthodes empiriques. Dans le prochain chapitre, nous allons lister des modèles dynamiques d’avalanche majeurs.

Chapitre 2. Dynamique des avalanches de neige et des écoulements granulaires

2.1 Introduction générale sur les avalanches de neige

2.1.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de décrire les différentes avalanches de neige. Nous abordons d'abord les classifications des avalanches de neige et les différents paramètres influents le comportement de l'avalanche. Ensuite, les modèles d'avalanche sont abordés afin de comparer les hypothèses qui les différencient. Cette étude se terminera par une analyse sur ces différents modèles et l'utilisation que nous pouvons en faire dans le cadre de cette thèse.

2.1.2 Définition et cause d'une avalanche de neige

Une avalanche de neige est un glissement d'une masse de neige sur un sol en pente. C'est un type d'écoulement gravitaire rapide composé de différentes tailles de blocs de neige, dû à une rupture d'équilibre dans le manteau neigeux. Le manteau neigeux est souvent un assemblage de plusieurs couches de neige. Les différentes couches de neige sont produites pendant les différentes périodes de chute de neige, sous diverses conditions météorologiques. Chaque couche peut avoir des propriétés et comportements mécaniques différents. Le manteau neigeux est donc un milieu hétérogène et complexe. Sur un plan incliné, le manteau neigeux est soumis à deux types de forces. Les forces dues à la gravité et celles dues au frottement. Le poids propre du manteau neigeux et toutes les surcharges potentielles appartiennent au premier type de forces. Les surcharges potentielles peuvent être une nouvelle couche de neige fraîche ou de neige transportée par le vent, une chute de pluie ou une quantité de neige apportée d'une corniche ou d'un sérac, une intervention humaine accidentelle (passage d'une ou plusieurs personnes, skieurs, …). Ils sont des éléments négatifs pour la stabilité du manteau neigeux. Le deuxième type de forces est représenté par les forces résistantes. Par exemple, le frottement du manteau neigeux sur le sol, le frottement entre les différentes couches de neige, la cohésion interne de la neige d'une même couche etc. Quand les couloirs sont assez étroits, le frottement latéral entre la neige et les bords du couloir peut aussi maintenir le manteau neigeux en place. Une rupture d'équilibre apparaît quand les forces de résistance sont plus faibles que les forces de gravité.

2.1.3 Classification des avalanches

Suivant les critères choisis ou les points de vue pris, la classification des avalanches peut être très diverse. Par exemple, selon la méthode de déclenchement, les avalanches peuvent être classifiées comme avalanches spontanées, artificielles ou accidentelles. Les avalanches spontanées sont déclenchées automatiquement à cause d'une évolution interne du manteau neigeux alors que les avalanches artificielles se produisent du fait de la volonté humaine. Enfin les avalanches accidentelles sont provoquées involontairement par les surcharges humaines (skieurs, randonneurs, etc.). Selon le niveau de glissement, les avalanches peuvent être différenciées en deux types : les avalanches de surface et de fond. Les avalanches de surface correspondent au glissement sur une couche de neige sous-jacente et les avalanches de fond correspondent à l'entraînement de la totalité du manteau neigeux. Selon la cohésion de neige, les avalanches sont également classifiées comme avalanches de plaque dure ou de plaque friable. Les avalanches de plaque dure se produisent généralement lorsque le manteau neigeux a été exposé à l'action du vent. La neige est dure et compacte, sa masse volumique est de l'ordre de 200 à 400 kg/m^3 et la vitesse de l'avalanche de 10 à 20 m/s. L'écoulement est

souvent un glissement de la couche supérieure sur une couche inférieure immobile. En général ces écoulements sont constitués de blocs de taille variable qui se brisent lors de la descente, la neige a une cohésion très forte. (Figure 2.1 a). Les avalanches de plaque friable possèdent un fort taux d'eau liquide. Celle-ci joue le rôle de lubrifiant entre les couches de neige et abaisse la cohésion de l'ensemble. La masse volumique est encore plus importante, de l'ordre de 400 à 500 kg/m^3. (Figure 2.1 b).

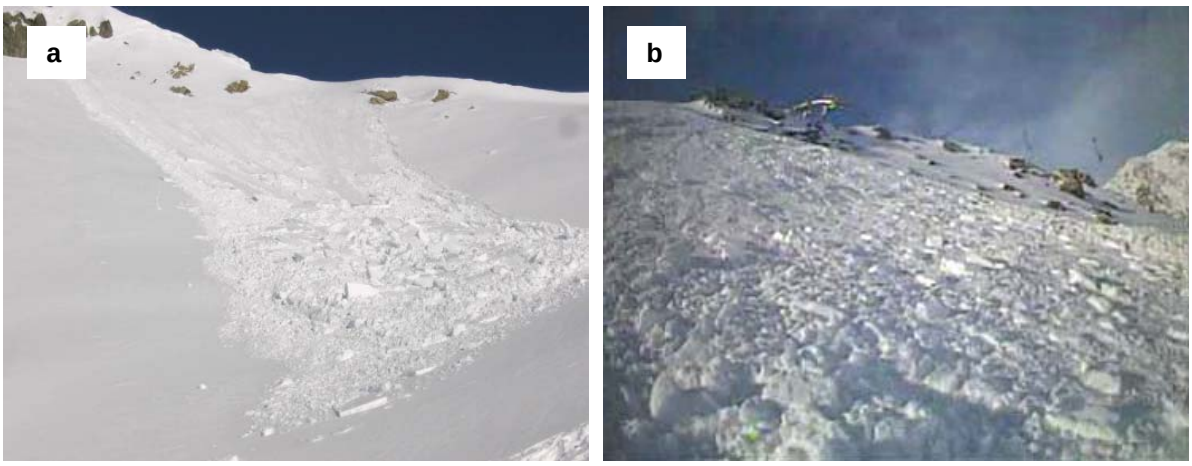


Figure 2.1 Classification selon la cohésion de la neige : a. Avalanche de plaque dure b. Avalanche de plaque friable.

La classification la plus courante est celle basée sur le comportement et les caractéristiques de l'écoulement. Certains critères se répètent par rapport aux autres classifications, mais elle reste la plus généralisée et la plus simple.

1. Avalanche de neige coulante (ou neige dense)

L'écoulement se fait en restant en contact avec le terrain, comme une lave, en suivant la ligne de plus grande pente. Ce sont des écoulements concentrés, dont la masse volumique moyenne est de 100 à 200 kg/m^3 et la vitesse de 20 à 40 m/s. Ce type d'avalanches est souvent traité comme un milieu granulaire car la neige s'écoule en formant des paquets ou grains. (Figure 2.2 a).

2. Avalanche en aérosol

L'écoulement se fait en présence d'un nuage de neige qui peut parfois mesurer plusieurs dizaines de mètres de haut et qui s'écoule selon une trajectoire quasi-rectiligne, de façon presque indépendante du terrain. Ces écoulements sont formés de neige fraîche, légère et peu cohérente, accumulée sur de fortes pentes (>30°). Les particules de neige occupent un volume de l'ordre de 1% du volume total de l'avalanche. Ainsi, ces écoulements se présentent sous la forme d'un mélange diphasique très turbulent, composé d'air et de particules de neige en suspension. Ce sont des phénomènes très rapides avec une vitesse de l'ordre de 100 m/s, et surtout très puissants (Figure 2.2 b).

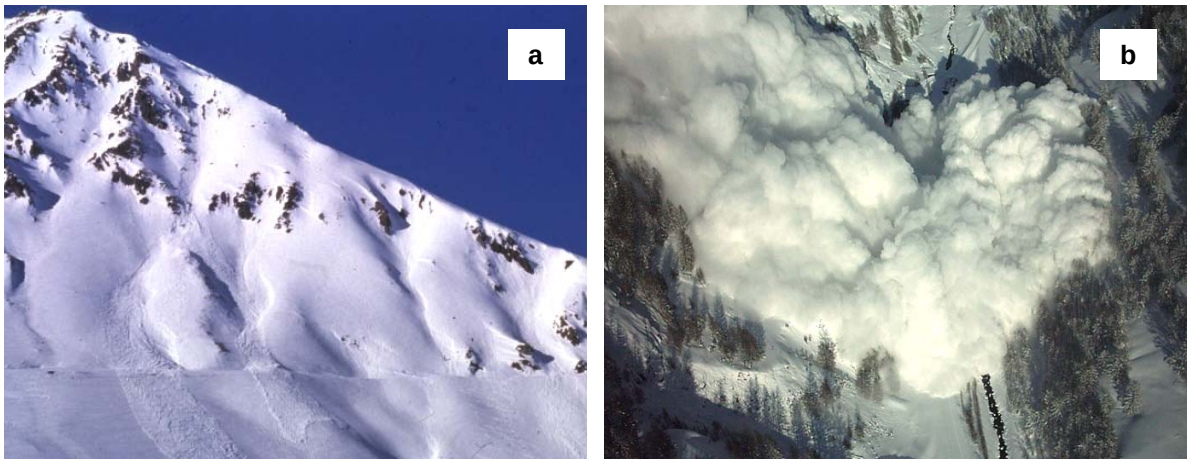


Figure 2.2 Classification générale : a. Avalanche coulante ou avalanche dense (photo par Cemagref) b. Avalanche en aérosol.

3. Avalanche mixte

L'écoulement est un mélange de deux modes précédents. Cela peut être une avalanche dense développant un petit panache de neige, surtout au niveau de son front ou un écoulement en aérosol traînant de la neige au niveau du sol. Les deux écoulements peuvent être autonomes ou dépendants. Dans ce cas, une importante variabilité de la densité peut être observée.

Figure 2.3 Classification générale : Avalanche mixte (photo originale)

2.1.4 Paramètres physiques d'une avalanche

Suivant les conditions météorologiques et topographiques, la taille et les caractéristiques dynamiques des avalanches peuvent être très variables. Une avalanche est généralement décrite par des paramètres physiques, comme la masse volumique, la vitesse, l'épaisseur de l'écoulement, et les coefficients de friction.

2.1.4.1 Masse volumique

La masse volumique de la neige au cours d'une avalanche est relativement mal connue. Il n'existe pas encore de moyens pour mesurer de manière fiable ce paramètre physique. Les valeurs de masse volumique des avalanches trouvées dans la littérature sont souvent estimées à partir de valeurs statiques. La masse volumique statique de la neige est mesurée directement dans la partie amont du manteau neigeux de l'avalanche ainsi que dans le dépôt final. Elle varie de 50 kg/m^3 pour de la neige froide et sèche à 500 kg/m^3 pour de la neige tassée.

2.1.4.2 Hauteur

La hauteur d'une avalanche est encore un terme difficile à définir, car une avalanche est souvent une composition de plusieurs couches de différentes masses volumiques, parfois avec une importante partie en aérosol. Actuellement, les vidéos enregistrées sont beaucoup utilisées pour estimer ce paramètre. En outre, le capteur optique de distance [Bouchet 2003] et le capteur ultrason [Platzer 2006] ont été utilisés récemment. Mais ces méthodes ont été appliquées pour des expériences sur modèle réduit, les conditions expérimentales étant relativement faciles à contrôler. Pour les avalanches naturelles de grande échelle, l'application de ces méthodes est loin d'être évidente.

2.1.4.3 Vitesse

Les dégâts provoqués par une avalanche de neige sont beaucoup liés à sa vitesse, donc à son énergie cinétique. Les avalanches de neige sont des écoulements très rapides et les valeurs de vitesses peuvent être très élevées. Le tableau 2.1 montre l'ordre grandeur de vitesse des avalanches de neige. Ce sont des valeurs estimées par les spécialistes au fur et à mesure de leurs expériences. Plusieurs méthodes de mesure ont été développées au cours de ces dernières années, comme les enregistrements à partir de caméras pour déterminer les vitesses de front, les capteurs optiques de type diode-photocellule [Dent 1998], [Bouchet 2003], [Platzer 2006], le radar [Gauer et al. 2008], ou une méthode sismique [Vilajosana et al. 2007] qui est plus globale. Malgré ces avancés, la connaissance de la vitesse des avalanches de neige reste toujours limitée.

type	petite	moyenne	grosse
Avalanche humide	0 à 10	10 à 20	20 à 35
Avalanche sèche	0 à 10	10 à 35	35 à 60
Avalanche aérosol	0 à 25	25 à 60	60 à 90

Tableau 2.1 Ordre grandeur des vitesses des avalanches de neige (m/s).

2.1.4.4 Frictions

Friction entre deux surfaces de neige

Le coefficient de friction entre deux couches de neige est un paramètre très difficile à obtenir à cause de la fragilité de neige. Des mesures ont été effectuées par [Casassa et al. 1991], à partir de deux échantillons de neige sous forme d'anneaux circulaires. Les anneaux sont ensuite plaqués l'un contre l'autre avec une force de pression N contrôlée et mises en rotation

l'un par rapport à l'autre avec une vitesse réglable. Le couple de résistance exercé sur l'échantillon tournant est mesuré, ce qui permet d'obtenir le frottement T entre les deux échantillons. La valeur du coefficient de friction est calculée par : $\mu = T / N$. La neige a un angle de frottement compris grossièrement entre 20° et 50°. Cet angle dépend de la taille des grains de neige et de leur forme.

Friction entre la neige et un autre matériau

La friction entre la neige et un autre matériau à la base de la couche est appelée la friction basale. Le coefficient de friction basal μ dépend de la rhéologie de neige et des conditions aux limites. Les études sur la friction basale sont très récentes. [Ancey 2006] a déduit ce coefficient statistiquement à partir de 173 événements d'avalanche dont les données sur les caractéristiques de la neige et les données topographiques sont bien connues. Ce sont des enregistrements provenant de 7 couloirs des régions alpines françaises de 1906 à 1976. Le principe de calcul a été basé sur le modèle de Coulomb où μ est lié simplement à la distance d'arrêt. A partir de la distance d'arrêt, par calcul inverse, le coefficient μ de chaque avalanche a été déterminé. Les résultats montrent que ce coefficient n'est pas constant et il varie dans une plage comprise entre 0,3 et 0,7 (Figure 2.4). Plusieurs facteurs influent la valeur μ. Un des facteurs importants est le volume de l'avalanche V. Une relation entre la valeur moyenne du coefficient de frottement et le volume V a été proposée par la formule suivante :

$$\overline{\mu}(V) = ae^{-V/V_0} \tag{2.1}$$

a et V_0 sont deux constants empiriques, $a = 0,525 \pm 0,007$, $V_0 = (2,76 \pm 0,01) \times 10^6$. Pour un volume donné, le coefficient de frottement moyen peut être déterminé par la formule (2.1), qui est représentée par la courbe continue dans la figure 2.4 a.

Des déterminations expérimentales de coefficients de friction dynamique ont également été effectuées en mesurant les efforts normaux et tangentiels [Platzer 2006], [Bouchet 2003].

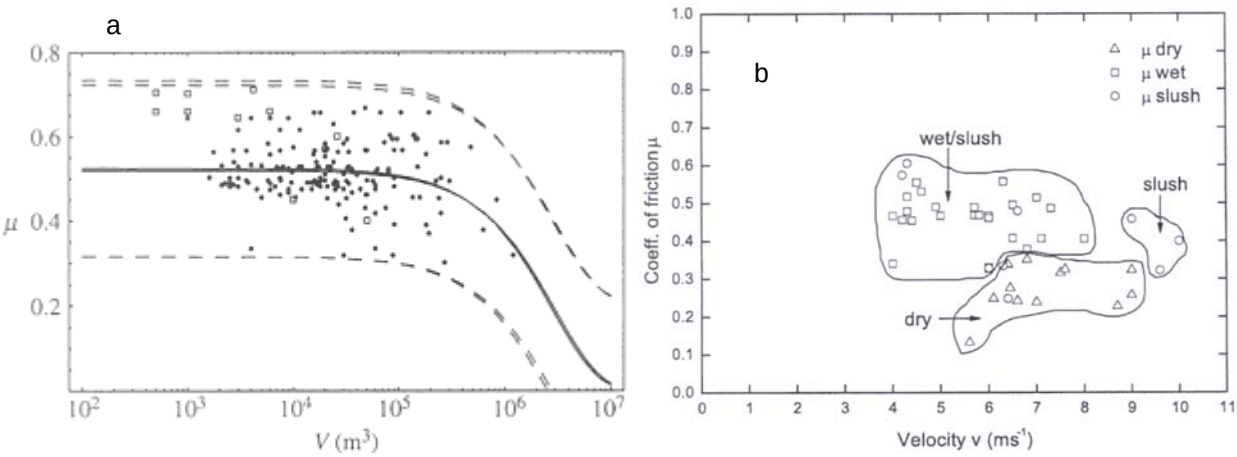


Figure 2.4 Coefficient de friction μ : a. Valeurs déduites à partir du volume de l'avalanche [Ancey 2006]. b. Mesures expérimentales [Platzer 2006].

2.2 Dynamique des avalanches de neige

2.2.1 Introduction

La dynamique des avalanches est complexe, elle concerne la mécanique des fluides, des particules et du sol. Le premier modèle d'avalanche de neige remonterait à 1922. L'ingénieur français Paul Mougin décrit une avalanche par analogie avec le mouvement d'un bloc glissant subissant une force de frottement, ce qui servit à dimensionner les premières remontées mécaniques de la vallée de Chamonix [Ancey 2006]. Dans les années 50, l'ingénieur suisse Voellmy a développé un modèle basé sur le modèle de Coulomb, en rajoutant un coefficient de frottement turbulent. Ce modèle a été largement utilisé par les ingénieurs jusqu'à présent du fait de sa simplicité. Les modèles hydrauliques intégrant les équations de Saint-Venant apparurent à partir des années 70. Avec le développement du calcul numérique, la résolution d'équations moyennées de type Saint-Venant est devenue abordable, ce type de modèles a donc été beaucoup étudié par les différents chercheurs. Un des modèles basés sur les équations du Saint-Venant les plus fréquemment rencontré est le modèle granulaire développé par Savage et Hutter [Savage et al. 1991]. Les lois de frottement de type Mohr-Coulomb et Coulomb ont été utilisées dans ce modèle.

Actuellement, il existe beaucoup de modèles dynamiques d'avalanches rattachés à un type d'avalanche. Mais il n'y a pas et il n'y aura probablement jamais de modèle simple qui peut décrire tous les types d'avalanches. La plupart des modèles sont difficilement calibrés et évalués à cause du manque de données sur les évènements réels.

2.2.2 Modèles dynamiques d'avalanche de neige coulante (ou dense)

Les avalanches denses faites de neige sèche ont été étudiées comme des écoulements granulaires. La majorité des études effectuées sur les écoulements granulaires denses utilisent le formalisme de la mécanique des milieux continus. Pour cette raison les avalanches denses sont décrites de cette manière.

2.2.2.1 Approximation du bloc glissant

Les modèles décrivant l'avalanche comme un bloc glissant sont largement appliqués de part leur simplicité. Dans ces modèles, les déformations internes sont négligées et l'avalanche est considérée comme un corps rigide et indéformable, glissant sur un terrain incliné. La vitesse et la masse volumique sont considérées uniformes et constantes à l'intérieur du bloc. Les hypothèses complémentaires sont les suivantes :

1. L'avalanche glisse le long d'un profil bidimensionnel curviligne. La ligne de glissement peut être décrite dans un système de coordonnées cartésiennes : $y = f(x)$. (Figure 2.5).
2. L'avalanche est considérée comme un écoulement peu profond, cela signifie que l'épaisseur de l'écoulement est très inférieure à sa longueur.
3. La trajectoire de l'avalanche ne subit pas de bifurcation brutale
4. Le profil en long varie continûment et régulièrement. C'est à dire que le rayon de courbure $R = \left(1 + f'(x)^{3/2}\right) / f''(x)$ est nettement plus grand que la longueur de l'écoulement L ($R >> L$).

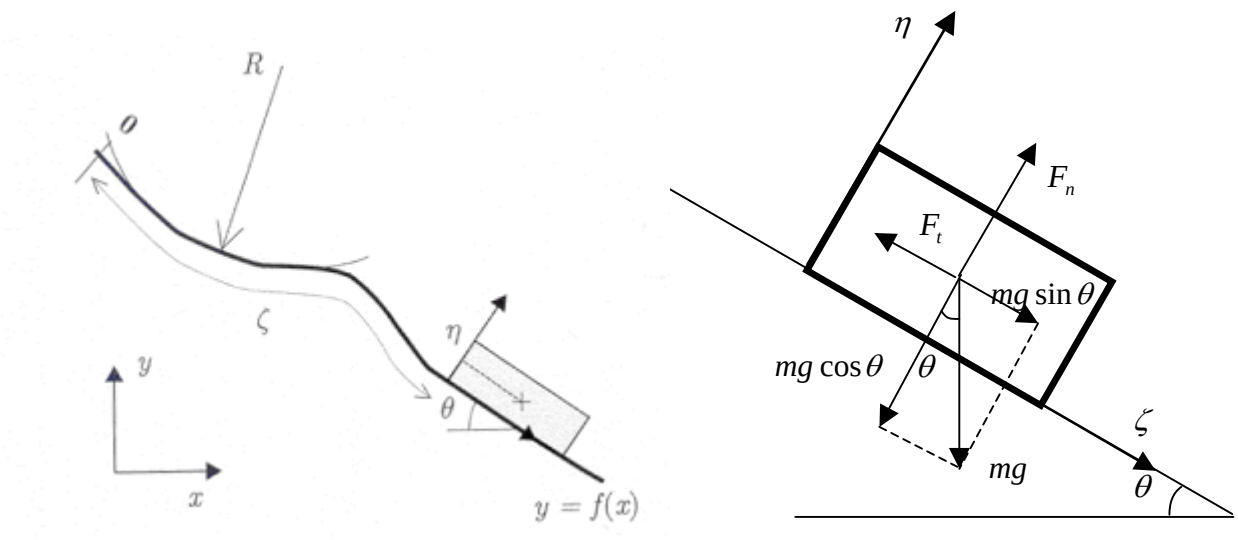


Figure 2.5 Schéma simplifié d'un bloc glissant sur un profil bidimensionnel curviligne.

Les équations de mouvement s'écrivent à partir du centre de masse du bloc. La coordonnée selon l'épaisseur du bloc est notée η. Les coordonnées curvilignes du centre de masse peuvent s'écrire (ζ,η). Les composantes contra variantes de la vitesse sont définies par $\left(u^{(1)},u^{(2)}\right)=\left(d\zeta/dt, d\eta/dt\right)$ et ses composantes physiques sont définies par $\left(u^{\langle 1\rangle},u^{\langle 2\rangle}\right)=\left((1-\eta/R)u^{(1)},u^{(2)}\right)$. Les composantes contra variantes de l'accélération dans la base naturelle sont :

$$a^{(1)}=\frac{d^2\zeta}{dt^2}+\Gamma^1_{11}\left(\frac{d\zeta}{dt}\right)^2+2\Gamma^1_{12}\frac{d\zeta}{dt}\frac{d\eta}{dt}+\Gamma^1_{22}\left(\frac{d\eta}{dt}\right)^2 \tag{2.2}$$

$$a^{(2)}=\frac{d^2\eta}{dt^2}+\Gamma^2_{11}\left(\frac{d\zeta}{dt}\right)^2+2\Gamma^2_{12}\frac{d\zeta}{dt}\frac{d\eta}{dt}+\Gamma^2_{22}\left(\frac{d\eta}{dt}\right)^2 \tag{2.3}$$

où Γ^k_{ij} est le symbole de Christoffel qui représente l'évolution des vecteurs de base. Certains coefficients de Christoffel sont nuls à cause de l'orthogonalité de la base naturelle, les non-nuls sont les suivants :

$$\Gamma^1_{12}=\Gamma^1_{21}=-\frac{K}{1-K\eta} \quad (2.4), \qquad \Gamma^1_{11}=-\frac{\eta}{1-K\eta}\frac{dK}{d\zeta} \quad (2.5), \qquad \Gamma^2_{11}=K\left(1-K\eta\right) \quad (2.6)$$

où K est la courbure, la vitesse dans la direction ζ est $u^{\langle 1\rangle}=\left(1-\eta/R\right)\frac{d\xi}{dt}$, la vitesse $u^{\langle 2\rangle}$ dans la direction η est nulle car l'écoulement a été supposé indéformable et η est constant. Les équations de la conservation de quantité de mouvement dans le repère curviligne sont :

$$(1-\frac{\eta}{R})^2\frac{d^2\zeta}{dt^2}+\frac{\eta}{R^2}\frac{dR}{d\zeta}\left(\frac{d\zeta}{dt}\right)^2=g\sin\theta(\zeta)-\frac{F_t}{m} \tag{2.7}$$

$$-\frac{1}{R-\eta}\left(\frac{d\zeta}{dt}\right)^2 = -g\cos\theta(\zeta) + \frac{F_n}{m} \tag{2.8}$$

Dans la formule (2.7), le premier terme à gauche représente la composante de l'accélération selon l'axe ζ, le deuxième terme définie les effets centrifuges dus à la courbure du profil. Le premier membre à droite concerne l'action motrice de la gravité, le deuxième terme est dû à la force de frottement exercée par le fond ou par le manteau neigeux. D'après l'hypothèse 2, si η / L est petit, alors que $R >> L$ (hypothèse 4), le ratio η / R est suffisamment petit pour être négligeable. Les formules 2.7 et 2.8 peuvent s'écrire alors comme suit :

$$\frac{d^2\zeta}{dt^2} = g\sin\theta(\zeta) - \frac{F_t}{m} \tag{2.9}$$

$$-\frac{1}{R-\eta}\left(\frac{d\zeta}{dt}\right)^2 = -g\cos\theta(\zeta) + \frac{F_n}{m} \tag{2.10}$$

Modèle de Coulomb

Les équations de mouvement 2.9 et 2.10 intégrées avec la loi de frottement de coulomb constituent le modèle de Coulomb. La loi de frottement de Coulomb s'écrit :

$$F_t = \mu F_n \tag{2.11}$$

Avec μ le coefficient de frottement équivalent à $\tan\phi$. ϕ est l'angle de frottement entre le matériaux et le fond. En combinant les formules 2.9, 2.10, 2.11, l'équation du mouvement peut se simplifier comme suit :

$$\frac{d^2\zeta}{dt^2} = g\cos(\theta(\zeta))(\tan(\theta(\zeta)) - \mu) + \frac{\mu}{R(\zeta)}\left(\frac{d\zeta}{dt}\right)^2 \tag{2.12}$$

D'après la formule 2.12, le mouvement d'écoulement est influencé par l'inclinaison du profil θ et la courbure du sol. L'écoulement accélère quand $\theta > \phi$ et décélère quand $\theta < \phi$. L'écoulement a une vitesse constante quand $\theta = \phi$, ce qui signifie un régime permanent de l'écoulement.

Modèle de Voellmy (1955)

Sur la base du modèle de Coulomb, Voellmy a pris en compte un frottement turbulent supplémentaire exercé par l'air, proportionnel au carré de la vitesse de l'avalanche. Ce coefficient est rajouté comme un terme dissipatif dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement. Une combinaison des deux coefficients de frottement (μ , ξ) définit un fluide de type Voellmy (FV). La force de frottement peut s'écrire sous la forme :

$$F_t = \mu F_n + m\frac{g}{\xi R_H}u^2 \tag{2.13}$$

Avec u la vitesse moyenne de l'avalanche et R_H le rayon hydraulique. $R_H = S/\chi$ représente une longueur caractéristique du frottement, avec S la section transversale d'écoulement et χ le périmètre mouillé de cette section. Le coefficient ξ représente l'influence de la rugosité du sol. Les valeurs empiriques sont données dans le tableau suivant :

Surface du sol	**ξ (m/s²)**
Sol rugueux, pente couverte ou boisée	300 à 500
Pente moyenne pas confinée	500 à 800
Pente glissante, sur la neige compacte et vieille	800 à 1500
Pente moyenne caniveau	500 à 800

Tableau 2.2 Coefficients de turbulence empiriques.

L'équation de mouvement devient :

$$\frac{d^2\zeta}{dt^2} = g\cos(\theta(\zeta))(\tan(\theta(\zeta)) - \mu) + \frac{\mu}{R(\zeta)}\left(\frac{d\zeta}{dt}\right)^2 - \frac{g}{\xi R_H}u^2 \tag{2.14}$$

avec $u = d\zeta/dt$, l'équation 2.14 peut s'écrire sous une forme plus générale :

$$u\frac{du}{d\zeta} = g\cos\theta(\zeta)(\tan\theta(\zeta) - \mu) + \frac{\mu}{R(\zeta)}u^2 - \frac{g}{\xi R_H}u^2 \tag{2.15}$$

D'après la conservation de masse, nous avons :

$$Q = Q_0 = h_0 l_0 u_0 \tag{2.16}$$

où Q est le débit volumique, h_0, l_0, u_0 sont respectivement la hauteur, la largeur et la vitesse initiales de l'avalanche. Quand les conditions initiales et les coefficients de frottement μ et ξ sont bien connus, avec la résolution des formules 2.15 et 2.16, les caractéristiques de l'avalanche peuvent être déterminées le long du profil de parcours.

Quelques simplifications et résolutions approchées : Dans le cas d'une pente uniforme, l'angle d'inclinaison θ est constant, le rayon de courbure est infini. En supposant que la vitesse initiale u_0 et la hauteur d'écoulement constant, l'équation 2.14 peut être résolue comme suit :

$$u^2(\zeta) = \frac{e^{-\lambda\zeta}}{\lambda}\left(\lambda u_0^2 + g\cos\theta(e^{\lambda\zeta} - 1)\right)(\tan\theta - \mu) \tag{2.17}$$

avec $\lambda = g/\xi R_H$. Dans cette formule, la seule variable est la position de l'avalanche ζ. Si l'avalanche atteint un régime permanent ($du/d\zeta = 0$), la formule 2.15 devient :

$$u = \sqrt{\xi R_H \cos\theta(\tan\theta - \mu)} \quad \text{(m/s)} \tag{2.18}$$

La vitesse est donc indépendante de la vitesse initiale. Pour une avalanche de versant sans confinement, $R_H \approx h$, la largeur de l'avalanche l est suffisamment grande pour être considérée comme constante. D'après 2.16, nous avons :

$$Q = Q_0 = h_0 l_0 u_0 = hlu \tag{2.19}$$

$R_H = h = h_0 u_0 / u$, la vitesse est devenue :

$$u = \sqrt[3]{\xi h_0 u_0 \cos\theta(\tan\theta - \mu)} \tag{2.20}$$

A partir d'un point où la pente commence à diminuer (tan $\theta < \mu$), l'avalanche commence à décélérer. La distance entre le point de décélération et le point d'arrêt est appelée la distance d'arrêt. D'après la formule 2.17, la distance d'arrêt peut définir par la formule suivante :

$$x_{arrêt} = \frac{1}{2\lambda} \ln\left(1 - \frac{\lambda u_a^2}{g\cos\theta(\tan\theta - \mu)}\right) \tag{2.21}$$

u_a correspond à la vitesse au point de décélération. Les vitesses dans la zone de décélération peuvent se déduire de

$$u(x) \approx u_a \sqrt{\left(1 - \frac{x}{x_{arrêt}}\right)} \tag{2.22}$$

Le modèle de Voellmy est un modèle assez simple et bien adapté dans les calculs simplifiés. Il permet de calculer la vitesse du front et la distance d'arrêt de l'avalanche. Mais il donne des valeurs de vitesse sous-estimées dans certains cas et des valeurs de distance d'arrêt qui varient sur plusieurs ordres de grandeur [Bouchet 2003].

Modèle de Perla, Cheng et McClung (Modèle de Voellmy amélioré) [Perla et al. 1980]

Le modèle de Perla, Cheng et McClung est une amélioration du modèle de Voellmy. Un effet le frottement dû à l'entraînement d'une partie du manteau neigeux a été considéré dans ce modèle. L'équation de mouvement simplifiée s'écrit :

$$\frac{du^2}{d\zeta} = g\cos\theta(\tan\theta - \mu) - \frac{D}{m}u^2 \tag{2.29}$$

Où le coefficient D intègre à la fois le frottement de turbulence exercé par l'air et le frottement dû à l'entraînement du manteau neigeux. m est la masse de l'avalanche. Le rapport $\frac{D}{m}$ peut varier dans un ordre de grandeur assez large, typiquement de 10^{-5} à 10^{-1} m^{-1}.

Modèle Salm-Burkard-Gubler (SBG)

Le modèle SBG est une extension du modèle de Voellmy. L'objectif est de simplifier les équations différentielles du mouvement et de fournir une résolution approchée simple. Des paramètres empiriques ont été proposés. d_0, épaisseur de neige entraînée par l'avalanche, est définie par la formule suivante :

$$d_0 = d_0^* f(\theta_0) \tag{2.23}$$

Le terme d_0^* correspond à l'épaisseur de neige tombée durant trois jours consécutifs dans la zone de départ. Il dépend des conditions climatiques, de l'inclinaison de pente et de la période de retour. Le coefficient $f(\theta_0) = 0{,}291(\sin\theta_0 - 0{,}202\cos\theta_0)^{-1}$, avec θ_0 la pente moyenne de la zone de départ. Pour une zone de départ à peu près rectangulaire, la vitesse initiale est :

$$u_0 = \sqrt{d_0 \xi (\sin\theta_0 - \mu\cos\theta_0)} \tag{2.24}$$

Pour une zone de départ de forme quelconque, le débit volumique initial est estimé par $Q_0 = V_0 / \Delta t$, où V_0 est le volume d'avalanche initial et Δt le temps que ce volume de neige met à se vidanger, $\Delta t = L_0 / u_0$ avec L_0 la longueur de l'avalanche dans la zone de départ. Dans le cas d'un écoulement le long d'un versant ou faiblement confiné, la vitesse de l'écoulement dans le régime permanent est :

$$u = \sqrt[3]{\xi \frac{Q_0}{l} \cos\theta(\tan\theta - \mu)} \tag{2.25}$$

Le modèle SBG propose une manière de déterminer le point de décélération. Tout d'abord, la vitesse maximale avant la décélération est définie :

$$u_p = \sqrt[3]{\xi \frac{Q_0}{l_p} \cos\varphi_p(\tan\varphi_p - \mu)} \tag{2.26}$$

avec φ_p la pente moyenne du tronçon AP. Le point P correspond au point de décélération et le point A se trouve à l'amont de P La détermination du point A dépend de la configuration topographique. Si la pente à l'amont du point P varie peu significativement, la position de A se fixe dans la pente $\theta_a = \theta_p + 3{,}5°$ (voir figure 2.6). Par expérience, la recherche de la position de A peut commencer par une montée à partir du point P d'une distance de 200 m le long du terrain naturel. Sur le tronçon AP, la vitesse u_p et la hauteur de l'avalanche $h_p = Q_0 / l_p u_p$ sont considérées constantes, et la pente moyenne est donnée par $\varphi_p = \theta_a$. Si la pente varie significativement avant le point P, l'angle θ_a est la pente moyenne entre P et A.

La position de A est obtenue avec le calcul de la longueur de AP $L_{Ap} \approx \dfrac{0{,}7\xi h_p}{g}$.

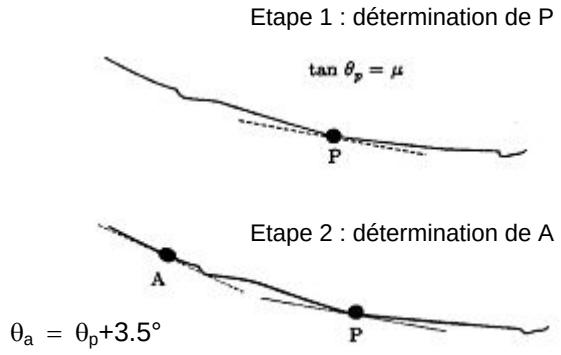


Figure 2.6 Définition du point de décélération P et du tronçon AP.

La distance d'arrêt et la vitesse dans la zone de décélération sont données par les formules suivantes :

$$x_{arrêt} = \frac{h_d \xi}{2g} \ln\left(1 - \frac{u_p^2}{h_d \xi (\sin\varphi_d - \mu \cos\varphi_d)}\right) \tag{2.27}$$

$$u_d(x) = u_p \sqrt{\left(1 - \frac{x}{x_{arrêt}}\right)} \tag{2.28}$$

avec φ_d la pente moyenne de la zone d'arrêt, h_d la hauteur moyenne de neige dans la zone de dépôt estimée par :

$$h_d = h_p + \frac{u_p^2}{10g} \tag{2.29}$$

Les estimations des valeurs ξ et μ fournies avec la méthode SBG sont données dans les tableaux suivants :

Conditions topographiques	ξ (m/s²)
Zone de forêt	400
Forte rugosité	500-600
Forte canalisation	
Pente uniforme	1000
Faible rugosité	
Faible canalisation	

Tableau 2.3 Valeurs de ξ pour différentes conditions topographiques.

Caractéristiques de l'avalanche	μ
Avalanche de neige mouillée de tout volume et à toute altitude	0,3
Petite avalanche toute altitude, épaisseur d'écoulement inférieur à 2 m	0,25-0,3
Grosse avalanche altitude inférieure à 1300-1500m, épaisseur d'écoulement supérieure à 2m	0,2
Grosse avalanche altitude supérieure à 1300m, épaisseur d'écoulement supérieure à 2m	0,15

Tableau 2.4 Valeurs de μ sous différentes conditions topographiques.

Des travaux de vérification du modèle SGB ont été lancés en le confrontant avec des avalanches bien documentées. D'après les résultats de Gubler, le modèle SBG sous-estime la vitesse des grosses avalanches et la distance d'arrêt des avalanches sur une pente proche de l'horizontale. Il sous-estime également la hauteur de neige dans la zone de transit mais surestime la hauteur de dépôt dans la zone d'arrêt. Pour les zones d'arrêt avec des variations significatives de la pente ou avec une pente relative forte, les résultats sont très sensibles à la segmentation le long du profil de terrain.

2.2.2.2 Déplacement en bloc déformable

Contrairement à l'approximation du solide glissant, ici l'avalanche est considérée comme un bloc déformable. Le principe des modèles de déplacement en bloc déformable est basé sur l'utilisation du formalisme de Saint-Venant, c'est à dire que les équations de mouvement sont moyennées sur l'épaisseur de l'écoulement. Selon différentes lois de comportement intégrées dans les équations de Saint-Venant, les modèles peuvent être divisés en deux branches, la branche basée sur la théorie hydraulique et celle basée sur la théorie granulaire. Les modèles hydrauliques ont été beaucoup développés analytiquement et numériquement au fur et à mesure des années 70 et 80. Les modèles granulaires apparurent dans les années 80 et 90, marquant un certain succès à travers les travaux de [Savage et al. 1991], [Hutter et al. 1995] Actuellement, la théorie granulaire est beaucoup étudiée par les chercheurs.

Pour écrire les équations de mouvement, les hypothèses simplificatrices sont les suivantes :

1. L'avalanche se déplace sur un profil bidimensionnel curviligne, l'angle d'inclinaison n'est pas ou peu variable.
2. Il n'y a pas de variation significative de la section d'écoulement sur une courte distance. La variation de l'écoulement sur la longueur est beaucoup plus grande que sur l'épaisseur. Il s'agit d'un régime graduellement varié, peu éloigné du régime permanent uniforme.
3. La trajectoire de l'avalanche ne subit pas de bifurcation brutale.
4. La surface de glissement exerce une contrainte de frottement τ_p sur l'avalanche.
5. L'avalanche est un milieu incompressible, la masse volumique est constante.

Les équations de conservation de masse et de quantité de mouvement locales s'écrivent donc :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \tag{2.30}$$

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho g - p + \nabla \sigma \tag{2.31}$$

où ρ est la masse volumique, u est le vecteur de vitesse, p la pression et σ le tenseur des contraintes. Sachant que la masse volumique est supposée constante, l'équation de conservation de masse peut simplifier à :

$$\nabla(u) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{2.32}$$

Cette équation est ensuite intégrée selon la hauteur d'écoulement, l'équation moyennée de la conservation de masse est :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} = 0 \tag{2.33}$$

$\bar{u}$ la vitesse moyennée selon la hauteur, elle est définie par $\bar{u} = \frac{1}{h(x,t)} \int_0^{h(x,t)} u(x,y,t)dy$. Il est possible de procéder de la même manière pour l'équation de la quantité de mouvement. L'équation moyennée dans l'épaisseur est alors définie par :

$$\bar{\rho}\left(\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\overline{u^2}}{\partial x} \right) = \bar{\rho} g h \sin\theta - \frac{\partial h\bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{\sigma}_{xx}}{\partial x} - \tau_p \tag{2.34}$$

où $\bar{p}$ est la pression moyenne, $\bar{\sigma}_{xx}$ la contrainte normale moyenne dans le sens de l'écoulement, $\tau_p = \sigma_{xy}(x,0,t)$ la contrainte de cisaillement ou frottement sur la surface de glissement. La vitesse moyenne selon la hauteur est alors définie comme suit :

$$\overline{u^2} = \frac{1}{h} \int u^2(x,y,t)dy = \alpha \bar{u}^2 \tag{2.35}$$

Le paramètre α est appelé le coefficient de quantité de mouvement de Boussinesq, il relie la moyenne du carré de la vitesse au carré de la vitesse moyenne. Ce coefficient dépend du profil de vitesse dans la couche. Typiquement pour un profil bouchon α=1, pour un profil linéaire α=4/3 et pour un profil parabolique α=5/4. Toute la rhéologie du matériau de neige est donc contenue dans le terme de contrainte de frottement τ_p. Différentes définitions de τ_p sont utilisées dans les différents modèles décrits par la suite.

Modèle de Dent et Lang [Dent et Lang 1983]

Ce modèle avait été proposé au début des années 80 par les américains Dent et Lang sur la base d'expériences sur la neige en laboratoire. C'est un modèle basé sur la loi de Bingham, en intégrant un comportement viscoplastique pour la neige.

La loi de Bingham est la plus simple des lois de fluide à seuil. Un milieu se comporte comme un solide tant que la contrainte de cisaillement est en dessous d'un seuil τ_0, et comme un fluide newtonien avec une viscosité η lorsqu'il dépasse ce seuil. Dans le cadre d'un écoulement simplement cisaillé, les équations constitutives s'écrivent :

$$\begin{cases} \dfrac{du}{dz} = 0 & \text{pour } \tau_p \leq \tau_0 \quad (2.36) \\ \tau_p = \tau_0 + \eta \dfrac{du}{dz} & \text{pour } \tau_p \geq \tau_0 \quad (2.37) \end{cases}$$

L'inconvénient de la loi de Bingham est de ne pas décrire les contraintes dans la partie 'solide' du milieu. Dans le modèle de Dent et Lang, le matériau de neige n'est plus considéré comme un fluide à seuil, mais comme un fluide possédant deux viscosités distinctes en fonction de la contrainte de cisaillement. Les équations constitutives deviennent :

$$\tau_p = \begin{cases} \eta' \dfrac{du}{dz} & \text{pour } \tau_p \leq \tau_0 \quad (2.38) \\ \tau_0 + \eta(\dfrac{du}{dz} - \dfrac{\tau_0}{\eta'}) & \text{pour } \tau_p \geq \tau_0 \quad (2.39) \end{cases}$$

η et η' étant les deux viscosités du matériau, $\eta' >> \eta$. Les paramètres τ_0, η et η' sont ajustés par simulation numérique en comparant avec des résultats expérimentaux. Le modèle a été beaucoup utilisé par le Cemagref de Grenoble il y a plus d'une dizaine d'années. Par contre, il est inadéquat pour simuler les écoulements à grande vitesse où l'effet collisionnel entre les grains est négligeable.

Modèle de Criminale-Ericksen-Filby (CEF)

La contrainte de cisaillement est définie comme suit :

$$\tau_p = \tau_c + \sigma \tan\varphi - \alpha\mu \frac{\partial(\bar{u} - u_0)^n / h}{\partial x} \quad (2.40)$$

Où u_0 est la vitesse de glissement au fond, α une constante, μ la viscosité et φ l'angle de frottement. Le coefficient de viscosité de la loi de puissance « n » est souvent pris égal à 2. Le premier terme du membre de droite représente la cohésion de la neige. Le deuxième terme est la contrainte de frottement de type Coulomb. Le dernier terme traduit un comportement visqueux.

Modèle de Norem, Irgens and Schieldrop (modèle NIS)

L'équipe de Norem en Norvège a amélioré le modèle CEF et nommé celui-ci modèle NIS. C'est un modèle plus complet qui permet de définir le lieu de la séparation entre la partie fluide et solide de l'écoulement et de prendre en compte l'effet collisionnel entre les grains, ce qui n'était pas le cas du modèle précédent. Le principe est toujours celui d'un fluide à seuil,

mais la partie fluide de l'écoulement est considérée comme un matériau granulaire cohésif. Pour un écoulement simplement cisaillé,

$$\begin{cases} \sigma_{xz} = a + bp_e + \rho\upsilon\dot{\gamma}^2 \\ \sigma_{zz} = -(p_e + p_u) - \rho\upsilon_2\dot{\gamma}^2 \\ \sigma_{xx} = -(p_e + p_u) - \rho(\upsilon_1 - \upsilon_2)\dot{\gamma}^2 \end{cases} \tag{2.41}$$

a : Contrainte de cohésion
b : Coefficient de friction
p_e : Pression effective, transmise par le réseau de contacts entre les grains
p_u : Pression de pore, transmise par le fluide interstitiel (l'air en l'occurrence) qui est une pression dispersive due aux collisions entre les grains. Elle est proportionnelle à $\dot{\gamma}^2$.
υ : Viscosité de cisaillement
υ_1 et υ_2 : Viscosités normales

Dans le cas d'un écoulement permanent sur un plan incliné de pente θ constante, le système d'équations obtenu est soluble analytiquement :

$$u(z) = \begin{cases} (v_1 - v_0)\left[1 - (1 - \dfrac{z}{h - h_p})^{3/2}\right] + v_0 & \text{pour} \quad 0 \le z \le h - h_p \\ \\ v_1 = v_0 + \dfrac{2}{3}\left[\dfrac{gh^3(\sin\theta - b\cos\theta)}{\upsilon - v\upsilon_2}\right]^{1/2} & \text{pour} \quad h - h_p \le z \le h \end{cases} \tag{2.42}$$

h_p : Hauteur de la partie « solide », $h_p = \dfrac{a}{\rho g(\sin\theta - b\cos\theta)}$.

v_0 : Vitesse de glissement au sol, elle est calculée en utilisant une approche semblable à celle de Voellmy, c'est-à-dire le frottement au niveau du sol est la somme d'une composante de friction proportionnelle au poids et d'un frottement turbulent avec l'air proportionnel au carré de la vitesse.

$$v_0 = \left[\frac{\rho gh(\sin\theta - b\cos\theta)}{k}\right]^{1/2} \tag{2.43}$$

Modèle de Savage et Hutter (modèle granulaire)

Savage et Hutter ont travaillé essentiellement sur des modélisations d'écoulement granulaire. Ces travaux ont proposé d'intégrer les lois de comportement du matériau granulaire dans les équations de mouvement de type de Saint-Venant. Dans ce modèle, le comportement constitutif du matériau a été décrit par un critère de Mohr-coulomb tandis que le

comportement basal a été traité par une loi de frottement de type Coulomb. Les écoulements ont été considérés comme des écoulements à surface libre de faible épaisseur $(h << L)$ et le matériau a été supposé incompressible. L'ensemble de l'écoulement a été considéré comme un milieu continu. Les équations de mouvement ont été écrites avec les paramètres physiques adimensionnés en système curviligne. Elles ont été ensuite discrétisées sous une forme différences finies. La méthode numérique permet de calculer la vitesse du front, les positions du front et de la queue et la hauteur de l'écoulement à chaque instant. Le modèle a été validé en comparant les résultats expérimentaux sur le mouvement d'une masse d'un matériau granulaire sec dans un lit incliné, une partie incurvée et une partie horizontale. Le schéma simplifié est montré dans la figure 2.7. La masse granulaire a une hauteur maximale h, ξ et η sont des coordonnées curvilignes. ξ_f et ξ_r correspondent respectivement la position du front et de la queue de l'écoulement. ζ est l'angle d'inclinaison du sol. k est la courbure et R est le rayon courbure.

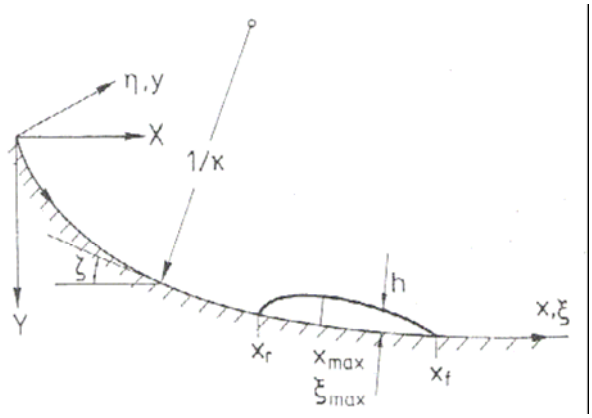


Figure 2.7 Une masse de matériau granulaire se déplace sur un sol rigide incurvé.

Equations de mouvement adimensionnalisées

Six paramètres principaux ont été utilisés pour adimensionnaliser les paramètres physiques. La longueur L et l'épaisseur maximale H de la masse granulaire à l'état initial, le rayon courbure du profil du sol R, les ratios $\varepsilon = H / L$ et $\lambda = L / R$. Les paramètres physiques adimensionnés sont les suivants :

$$\left(\tilde{\xi}, \tilde{\eta}, \tilde{k}\right) = \left(\xi / L, \eta / H, kL / \lambda\right)$$
$$\left(\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{t}\right) = \left(u / \sqrt{(gL)}, vL / H\sqrt{(gL)}, t / \sqrt{(L / g)}\right)$$
$$\left(\tilde{p}_{\xi\xi}, \tilde{p}_{\eta\eta}, \tilde{p}_{\xi\eta}\right) = \left(p_{\xi\xi} / [\rho g H \cos\zeta_0], p_{\eta\eta} / [\rho g H \cos\zeta_0], p_{\xi\eta} / \tan\delta\right)$$

avec $p_{\eta\eta}$, $p_{\xi\xi}$, $p_{\xi\eta}$ la pression normale, la pression tangentielle et la pression de frottement à la base. La loi de frottement de type de Coulomb définit la relation entre l'effort normal et tangentiel et s'écrit : $S = \pm N \tan\delta$, où S, N et δ correspondent à l'effort de cisaillement, l'effort normal et l'angle de frottement basal $p_{\xi\eta}$ et $p_{\eta\eta}$ sont liés par la relation $p_{\xi\eta} = p_{\eta\eta} \tan\delta$. Le rapport entre la pression tangentielle et la pression normale est évalué par $p_{\xi\xi} = k_{actpass}\, p_{\eta\eta}$, où $k_{actpass}$ est le coefficient de poussée et de butée. Il peut être une valeur

active k_{act} où une valeur passive k_{pass} selon la valeur de vitesse dans la direction longitudinale. k_{act} correspond un état actif où un élément matériau granulaire s'allonge et k_{pass} correspond un état passive où l' élément matériau granulaire est comprimé.

$$\left.\begin{matrix} k_{act} \\ k_{pass} \end{matrix}\right\} = 2\left[\frac{1 \mp \sqrt{\left(1-\cos^2\phi/\cos^2\delta\right)}}{\cos^2\phi}\right] - 1 \text{ , pour } \frac{\partial u}{\partial \xi} = \begin{cases} > 0 \\ < 0 \end{cases} \tag{2.44}$$

Les équations de mouvement adimensionnelles s'écrient :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial \xi} = 0 \tag{2.45}$$

$$\frac{d\bar{u}}{dt} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} = \sin\zeta - \tan\delta\,\mathrm{sgn}(\bar{u})(\cos\zeta + \lambda k\bar{u}^2) - \varepsilon k_{actpass}\cos\zeta\frac{\partial h}{\partial \xi} \tag{2.46}$$

Dans l'équation de quantité de mouvement 2.46, les termes qui ont un ordre plus élevé que le terme ε sont négligés. Le premier terme à droite est dû à la contribution de la gravité. Le deuxième est la force de frottement basale, comprenant la force de frottement due à la rugosité de terrain et due à la force centrifuge. Le dernier terme représente le gradient de la pression longitudinale dû à la variation de la profondeur de la masse granulaire.

Méthode numérique Lagrangienne

Le calcul numérique a été basé sur la méthode de différence finis Lagrangienne. La masse de matériau granulaire est initialement discrétisée en plusieurs cellules (voir figure 2.8). La frontière de cellules est notée *j* et le centre de cellules est noté *i*. Les positions des points sur la frontière à l'instant t=n-1 sont indiquées par ξ_j^{n-1}. Les vitesses de ces points sont définies à un demi pas de temps et exprimées comme $\bar{u}_j^{n-1/2}$. Sur chaque cellule sont appliquées les équations de conservation de masse et de conservation de quantité de mouvement. D'après l'équation de conservation de la masse, $\Delta L_i \bar{h}_i = const$, où $\Delta L_i = \xi_{j+1} - \xi_j$.

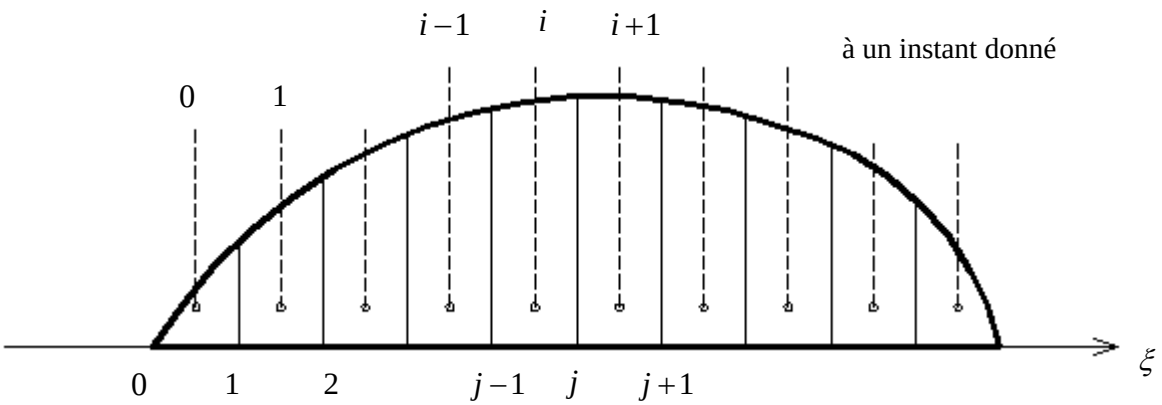


Figure 2.8 Discrétisation d'une masse de matériau granulaire avec la méthode Lagrangienne.

En supposant que la position ξ_j^{n-1}, la hauteur h_i^{n-1} et la vitesse $u_j^{n-1/2}$ de chaque cellule à temps initial (t=0) sont connues, les nouvelles positions, hauteurs peuvent être calculées avec les équations suivantes :

$\xi_j^n = \xi_j^{n-1} + u_j^{n-1/2}\Delta t$, avec Δt est le pas de temps. $h_i^n = h_i^{n-1}\dfrac{\left(\xi_{j+1}^{n-1} - \xi_j^{n-1}\right)}{\left(\xi_{j+1}^n - \xi_j^n\right)}$. La nouvelle vitesse peut se calculer à partir de l'équation de quantité de mouvement.

$$u_j^{n+1/2} = u_j^{n-1/2} + \Delta t\left[\sin\zeta_j - \tan\delta\,\mathrm{sgn}\left(u_j^{n-1/2}\right)\left(\cos\zeta_j + \lambda k_j\left(\bar{u}_j^{n-1/2}\right)^2\right) - \varepsilon k_{actpass}\cos\zeta_j\frac{\left(h_i^n - h_{i-1}^n\right)}{\left(\xi_i^n - \xi_{i-1}^n\right)}\right]$$

(2.47)

Où $\xi_i^n = \frac{1}{2}\left(\xi_j^n + \xi_{j+1}^n\right)$, représente la position du centre de la cellule. Pour amortir une amplification possible des gradients de vitesse et réduire ainsi les fluctuations numériques, un terme de viscosité numérique est rajouté dans la partie droite de formule 2.48.

$$\psi_j^n = \mu\left(u_{j+1}^{n-1/2} - 2u_j^{n-1/2} + u_{j-1}^{n-1/2}\right)/\left(x_{j+1}^n - x_{j-1}^n\right)^2 \qquad (2.48)$$

Avec μ la viscosité artificielle qui est souvent comprise entre 0,15 et 0,3.

Synthèse

Avec le modèle de Savage-Hutter, il est possible d'obtenir l'évolution des écoulements granulaires sur une pente inclinée. Les résultats numériques ont donné de bonnes prévisions pour les expériences de laboratoire. Cela a constitué une grande évolution à l'époque par rapport aux autres méthodes d'approximations analytiques. Par contre, les lois de comportement intégrées sont très discutables. La rhéologie des matériaux granulaires dans l'état d'écoulement est très compliquée et toujours mal connue jusqu'à présent. Le critère de Mohr-Coulomb, qui est un critère de rupture statique du matériau interne, ne s'applique pas en régime d'écoulement. Même chose pour le frottement basal de type Coulomb, l'hypothèse d'un coefficient de frottement μ constant (μ = tan δ) reste une approximation grossière. Pour un écoulement en régime uniforme et stationnaire, le coefficient μ est constant et défini par μ = tan θ, avec θ angle d'inclinaison de pente, or plusieurs auteurs s'accordent à dire que le coefficient μ ne peut être constant mais qu'il varie en fonction du type d'écoulement (accéléré ou décéléré). Donc la loi de frottement basale de type Coulomb n'est pas suffisante, car le coefficient μ dépend de l'épaisseur et de la vitesse moyenne locale de l'écoulement [Pouliquen 2001]. Des lois de frottement basales et internes plus réalistes et plus complexes ont été proposées au cours de ces dernières années.

2.2.3 Bilan sur les modèles

Un bilan sur les modèles dynamiques des avalanches de neige est présenté dans la figure 2.9. Cette synthèse de différents modèles est tirée du projet SAME (Snow Avalanche Modelling, Mapping and Warning in Europe) [Harbitz et al. 1998].

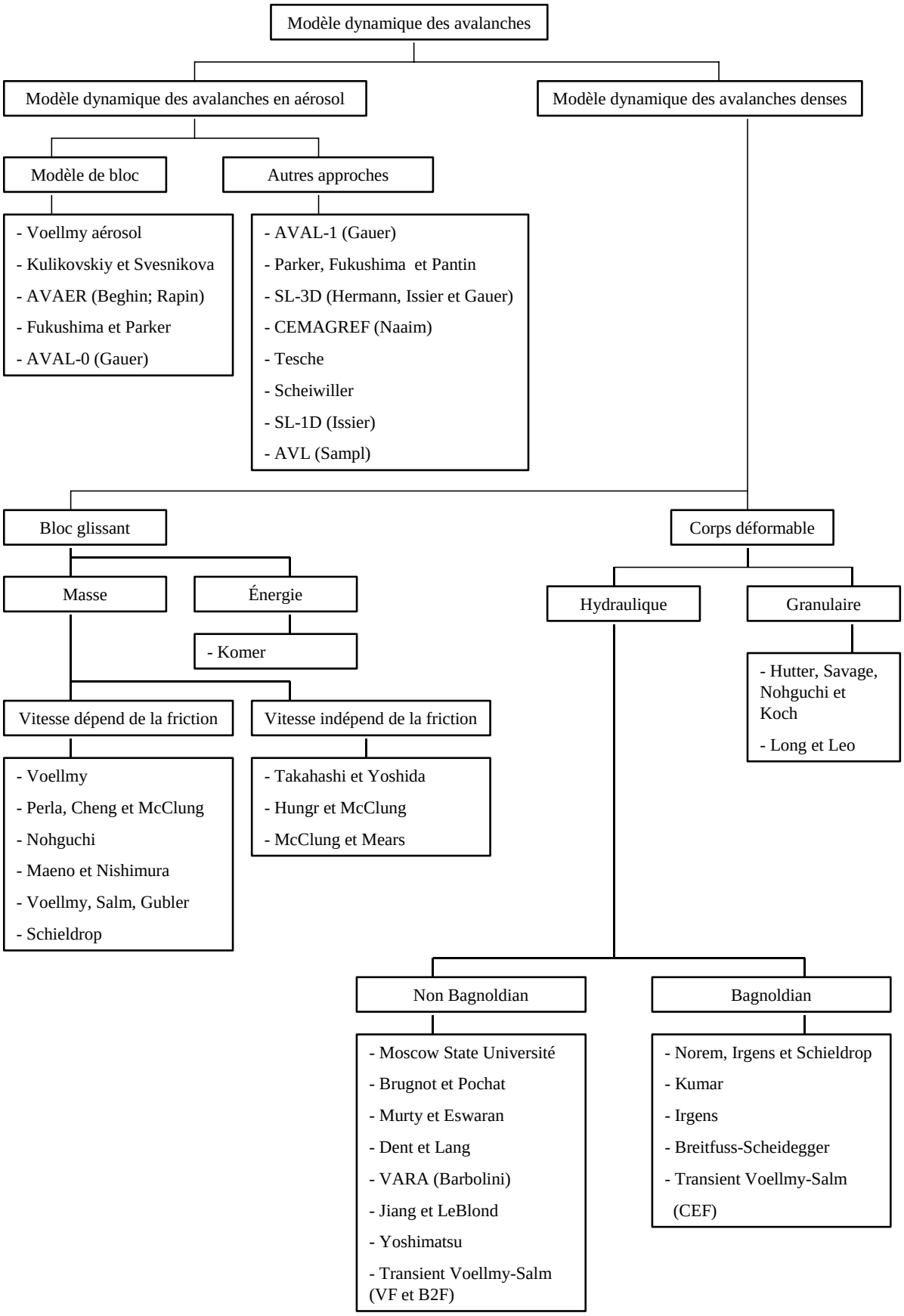


Figure 2.9 Résumé des modèles dynamiques des avalanches de neige.

2.3 Dynamique des écoulements granulaires non-cohésifs

2.3.1 Introduction générale

Le modèle de Savage et Hutter présente un certain nombre de limites explicitées dans le paragraphe précédent. Ces dernières années beaucoup d'expérimentations sur des matériaux granulaires (billes de verre ou sables) ont été effectuées, et elles ont contribué à améliorer la prédiction des comportements macroscopiques des écoulements granulaires sur un plan incliné. En outre, la théorie cinétique et la dynamique moléculaire ont également été développées, mais elles sont trop lourdes à implémenter pour décrire les écoulements réels.

2.3.2 Régimes d'écoulement granulaire

Un matériau granulaire est un milieu complexe car il peut se comporter comme un solide, un liquide ou un gaz suivant les sollicitations imposées [Jaeger & Nagel 1996] (figure 2.10). Selon les différents comportements des particules, les écoulements granulaires peuvent être divisés en trois régimes distincts : le régime quasi-statique, le régime dense et le régime rapide et dilué. Le régime quasi-statique apparaît par exemple quand un ensemble de grains posés sur une table forme un tas statique. Malgré des contraintes de cisaillement présentes dans le tas, le milieu reste sans mouvement comme un solide et les grains restent en contact avec plusieurs de leurs voisins. A l'autre extrême, si un récipient rempli de billes est secoué énergiquement, le milieu devient très agité avec des particules bougeant dans tous les sens et interagissant par collisions. Le milieu ressemble donc à un gaz et présente le régime rapide et dilué. Enfin entre les deux états précédents, comme dans un sablier par exemple, les particules interagissent à la fois par collision et contacts frictionnels de longue durée et s'écoulent comme un fluide. C'est le régime dense. En raison du rôle prépondérant de la dissipation, beaucoup d'écoulements sont en pratique dans le régime dense.

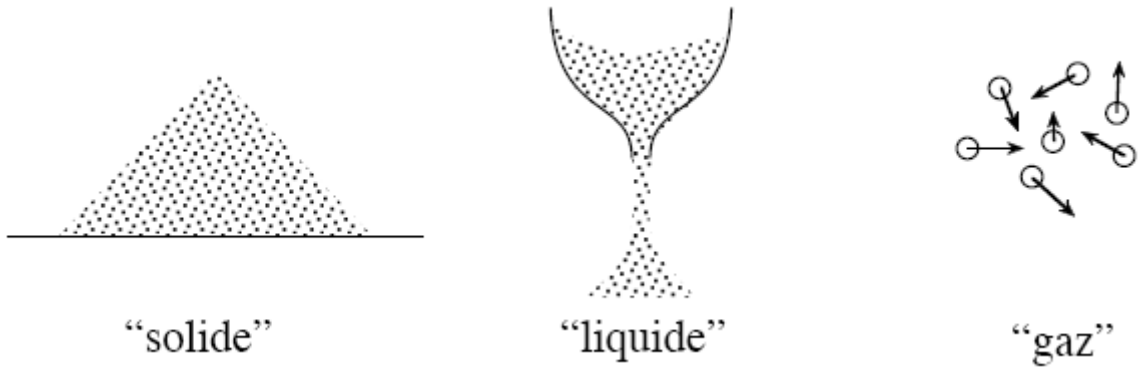


Figure 2.10 Trois états d'un matériau granulaire [Pouliquen 2001].

2.3.2.1 Régime quasi-statique

Dans le régime quasi-statique, l'énergie cinétique des particules est quasiment nulle. Les contraintes appliquées aux particules ne sont pas suffisantes pour qu'elles se déplacent individuellement. Coulomb (1773) introduisit une loi de frottement à partir d'une couche de

terrain sur une surface libre inclinée. Il montra que la couche de terrain à la surface libre est en équilibre tant que la composante de son poids propre parallèle à cette surface T est inférieure à une fraction K de sa composante normale à cette surface N (T<KN). K est appelé coefficient de frottement solide, défini par $K = \tan\varphi$, avec φ angle de frottement interne du matériau. D'après ce modèle, la fraction K et l'angle d'inclinaison maximal de la surface $\theta_{\max}$ ont une relation simple donnée par $K = \tan\theta_{\max}$.

2.3.2.2 Régime rapide et dilué

Dans le régime rapide et dilué, les particules sont très agitées et possèdent une énergie cinétique élevée. Les mouvements aléatoires des particules ont été considérés comme un comportement analogue à une agitation thermique dans un gaz. Nous verrons que cette notion est souvent utilisée pour quantifier l'agitation des grains.

La théorie cinétique des milieux granulaires a été développée dans les années 80. L'intensité de l'énergie cinétique est proportionnelle à la fluctuation de vitesse des particules. La fluctuation de vitesse des particules est souvent définie par la température granulaire *T*. La définition de la température granulaire *T* en 3D est la suivante [Goldhirsh 2003] :

$$T = \frac{1}{3}\left(\left\langle u'^2\right\rangle + \left\langle v'^2\right\rangle + \left\langle w'^2\right\rangle\right) \tag{2.49}$$

Les termes $\left\langle u'^2\right\rangle$, $\left\langle v'^2\right\rangle$, $\left\langle w'^2\right\rangle$ sont les moyennes des vitesses de fluctuation des particules au carré dans les directions x, y, z. Par exemple dans la direction x, $\left\langle u'^2\right\rangle = \left\langle (u_i - \bar{u})^2\right\rangle$, avec u_i la vitesse des particules et $\bar{u}$ la vitesse moyenne de ces particules.

$$\bar{u} = \frac{1}{n(\vec{r},t)}\int \vec{u} f^{(1)}(\vec{u},\vec{r},t)\, d\vec{u} \tag{2.50}$$

Le terme $f^{(1)}$ est la fonction de répartition d'une particule au point r et à l'instant t. Il signifie que le nombre de particules à la position r, au temps t, ayant une vitesse v. $n(\vec{r},t)$ défini la densité volumique instantanée de particules, $n(\vec{r},t) = \int f^{(1)}(\vec{u},\vec{r},t)\, d\vec{u}$.

2.3.2.3 Régime dense

Le régime dense est un régime entre le régime quasi-statique et le régime dilué où il existe à la fois des contacts frictionnels de longue durée et des réarrangements provocants des chocs inélastiques entre les particules. Selon la domination de l'effet de collision ou de friction, l'écoulement peut être caractérisé comme un écoulement dense frictionnel, un écoulement dense collisionnel et un écoulement intermédiaire [Naaim-Bouvet et Naaim 2000]. Dans un écoulement de type dense frictionnel, le taux de cisaillement est faible, le contact inter-granulaire est relativement permanent, changeant doucement, l'effet inertiel des particules est négligeable. Le matériau granulaire est souvent décrit par un comportement de type Mohr-Coulomb. Dans un écoulement dense collisionnel où le taux de cisaillement est fort, la théorie cinétique est utilisée. Le régime dense intermédiaire est une transition entre le régime dense

frictionnel et le régime collisionnel, il concerne beaucoup d'écoulements réels. De nombreuses d'études sont exécutées sur l'écoulement dans le régime dense intermédiaire. Cependant, la connaissance sur la dynamique et la rhéologie de l'écoulement en régime dense intermédiaire n'est toujours pas complète.

Le comportement d'un écoulement dense soumis à une déformation de cisaillement continu a été beaucoup étudié [GDR Midi 2004] a collecté des études expérimentales et numériques de six configurations d'écoulement dense. Le figure 1.x montre les schémas simplifiés de ces configurations et leurs profils de vitesse correspondants.
Pour le cisaillement plan homogène (figure 2.11 a), le profil de vitesse est linéaire ($I < 0.1$) ou légèrement en forme de S ($I > 0.1$). (b) est la configuration d'un plan incliné, son profil de vitesse obéit à une forme parabolique. L'augmentation de l'inclinaison de la pente et le taux de cisaillement mènent à un profil de plus en plus concave. (c) est un écoulement sur un fond meuble. Le profil de vitesse se compose d'une partie supérieure linéaire dans l'écoulement et d'une partie inférieure exponentielle dans le lit granulaire. (d) représente un essai de cisaillement annulaire, sa forme de profil de vitesse est exponentielle et elle ne dépend pas du taux de cisaillement $\dot{\gamma}_w$. (e) est une chute verticale, la vitesse est constante au centre de cylindre et elle varie dans deux zones cisaillées proche de deux murs rugueux. (f) est la configuration en tambour tournant, le profil de vitesse est le même que le cas d'un écoulement à la surface libre sur un tas meuble.

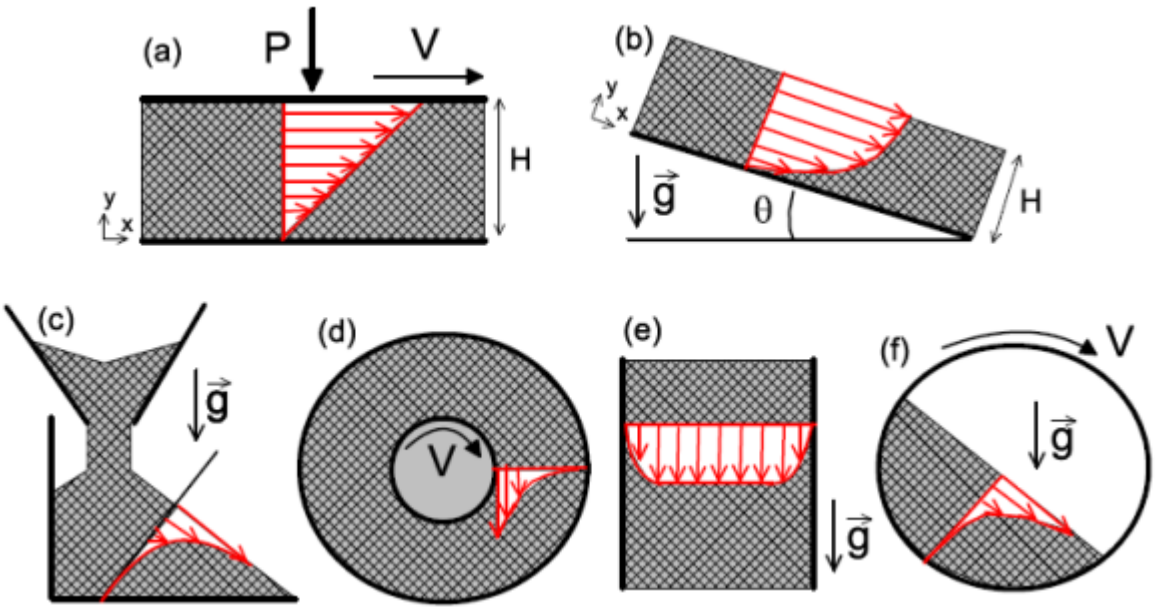


Figure 2.11 Six configurations d'écoulement dense et leurs profils de vitesse correspondants.

Cisaillement plan homogène

Le cisaillement plan homogène est la configuration la plus simple pour étudier la rhéologie d'un écoulement granulaire. Une couche de matériau granulaire est confiné entre deux plaques parallèles rugueuses sous une pression constante P (voir figure 2.11 (a)). La plaque supérieure subit une vitesse horizontale constante et la contrainte de cisaillement est mesurée. En raison de la gravité, cet état homogène n'est pas réalisé par les expérimentations mais par les simulations numériques discrètes [GDR MiDi 2004]. Les simulations numériques

discrètes récentes [Da Cruz et al. 2004] [Iordanoff et al. 2004] ont montré que l'état de cisaillement peut être caractérisé à partir d'un nombre sans dimension nommé le nombre inertie *I*.

$$I = \frac{|\dot{\gamma}|d}{\sqrt{P/\rho_s}} \tag{2.51}$$

Où $\dot{\gamma}$ étant le taux de cisaillement, *d* le diamètre de particule, *P* la pression verticale appliquée, ρ_s la masse volumique de particule. La valeur du nombre *I* représente l'inertie des particules. Quand les valeurs de *I* sont faibles ($I < 10^{-3}$), l'inertie des particules peut être négligée. L'ensemble des particules peut être considéré dans un régime quasi-statique. Au contraire, quand les valeurs de *I* sont suffisamment grandes ($I > 0,2$), l'inertie des particules devient très élevée, les particules sont agitées comme dans le régime dilué. Entre ces deux valeurs ($10^{-3} < I < 0,2$), l'ensemble des particules peut être considéré dans le régime dense.
Ce paramètre peut également être interprété par le ratio de deux temps caractéristiques du système [GDR MiDi 2004].

$$I = \frac{c}{T_\gamma} \quad \text{avec } T_p = d\sqrt{\frac{\rho}{P}} \text{ et } T_\gamma = \frac{1}{\dot{\gamma}} \tag{2.52}$$

où T_γ est le temps nécessaire pour qu'une couche se déplace horizontalement d'une distance *d*. T_p peut être interprété comme le temps nécessaire que met la couche supérieure à refouler dans sa position inférieure. Les résultats numériques ont aussi montré que si l'épaisseur de la couche H est suffisamment grande et l'influence de l'effet de bord négligeable, le coefficient de frottement effectif (le rapport entre la contrainte tangentielle et la contrainte normale) est en fonction de *I* uniquement.

$$\frac{\tau}{P} = \mu(I) \tag{2.53}$$

Ecoulement sur un plan incliné

Un écoulement granulaire sur un plan incliné a un comportement similaire à des écoulements gravitaires sur des pentes naturelles (avalanches de neige, laves torrentielles, éboulements de terrain etc.). C'est ce type d'écoulement qui intéresse notre étude. A cause de sa simple configuration, le nombre de degrés de liberté est faible. Les paramètres principaux contrôlant l'écoulement sont l'angle d'inclinaison du plan θ et le débit *Q* (ou l'épaisseur de la couche fluide). Par conséquent, de nombreuses d'études de ce type ont été faites depuis des dizaines années à l'aide d'expérimentations et de modélisations numériques basées sur la méthode des éléments discrets [Pouliquen 1999], [Prochnow 2002], [Daerr 2000].

Seuils d'écoulement

Les premières observations expérimentales ont montré qu'il existe un seuil d'écoulement [Pouliquen 1996]. Une couche de matériau granulaire uniforme stationnaire sur un plan incliné peut se mettre à couler à partir d'un certain angle critique (θ_{start}). Au contraire, un

écoulement continu peut s'arrêter si l'inclinaison de pente diminue. L'angle correspondant est nommé θ_{stop}. Ces deux angles critiques dépendent de l'épaisseur initiale de la couche. Plus la couche est mince, plus ces deux angles sont grands. Une relation entre ces paramètres a été établie à partir de mesures expérimentales. En pratique, il est beaucoup plus facile de mesurer une épaisseur critique à angle fixé plutôt que de mesurer les angles critiques. Cela peut être réalisé de la manière suivante : à partir d'un angle d'inclinaison donné, l'alimentation d'un écoulement continu est soudainement coupée. Un dépôt uniforme constant peut ensuite être observé. L'épaisseur de ce dépôt est appelé h_{stop}. Cette épaisseur est indépendante de l'histoire de l'écoulement et ne dépend que de l'angle d'inclinaison θ. L'expression de h_{stop} en fonction de l'angle θ a été proposée par [Pouliquen 1999] et ajustée par [Forterre et al. 2003] :

$$h_{stop}(\theta) = L_0 \frac{\mu_2 - \tan(\theta)}{\tan(\theta) - \mu_s} \tag{2.54}$$

avec $\mu_s = \tan(\theta_s)$ et $\mu_2 = \tan(\theta_2)$. θ_s correspond à l'angle pour lequel h_{stop} diverge, c'est un angle proche de l'angle de frottement interne du matériau. θ_2 correspond un angle pour lequel $h_{stop} = 0$ (voir figure 2.12 a). Ce sont des paramètres dépendent de la nature du matériau. Dans la zone en dessous de la courbe h_{stop}, il n'existe pas d'écoulement. Entre ces deux courbes, la couche de matériau granulaire peut être en état d'arrêt ou en écoulement stationnaire uniforme. Dans la zone en dessus de la courbe h_{start}, si l'angle d'inclinaison est modéré ($\theta < \theta_2$), le matériaux est en écoulement stationnaire uniforme. Si l'angle d'inclinaison est assez grand ($\theta > \theta_2$), le matériau est en écoulement accéléré et non uniforme. La figure 2.12 b montre des courbes de h_{stop} et h_{start} similaires retrouvées par [Daierr 2000]. Sur une même épaisseur de couche, θ_{start} et θ_{stop} ont environ 6° de décalage.

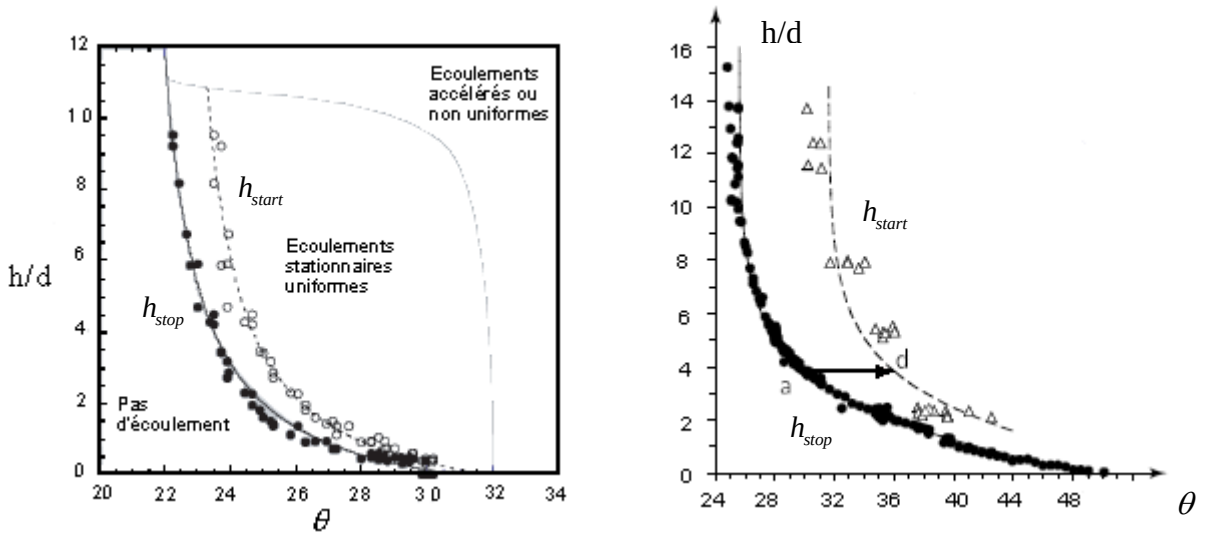


Figure 2.12 Diagramme h_{stop} et h_{start} : a. Diagramme de phase tiré de [Pouliquen1999]. b. Les courbes retrouvées par [Daerr 2000].

La forme des courbes obtenues par Daerr est conforme à celle obtenue par Pouliquen. Par contre, il est à noter un décalage sur l'axe des abscisses qui provient de la différence des matériaux utilisés.

Loi d'écoulement

[Pouliquen 1999a] a effectué des mesures de vitesses moyennes en fonction de l'épaisseur d'écoulement et de l'angle de d'inclinaison θ. Les résultats expérimentaux montrent que le nombre de Froude est proportionnel au rapport h / h_{stop} (voir figure 2.13 a). Cette relation est appelée la loi d'échelle ou la loi d'écoulement, elle s'écrit :

$$Fr = \frac{\bar{u}}{\sqrt{gh}} = \beta \frac{h}{h_{stop}(\theta)} \tag{2.55}$$

où β est une constante empirique valant 0.136 pour des billes de verre. D'après cette relation, la vitesse moyenne varie avec l'épaisseur approximativement à la puissance 3/2, ce qui est cohérent avec le fait que le profil de vitesse est de type Bagnold. Cette courbe est néanmoins non universelle et dépend du matériau et de la rugosité du fond. Le figure 2.13 b montre quatre courbes de nombre de Froude en fonction de h / h_{stop} pour différents matériaux et fonds rugueux. La courbe représente les résultats numériques obtenus par [Prochow 2000]. Ce sont des disques 2D sur disques 2D. La courbe (2) est celle des résultats expérimentaux basés sur des billes de verre sur billes de verre, obtenus par [Pouliquen 1999]. Les courbes (3) et (4) représentent les résultats de sables sur sables [Forterre et al. 2003] et sur moquettes [Rognon 2003]. Une expression plus générale de la loi d'écoulement peut s'écrire :

$$Fr = \frac{\bar{u}}{\sqrt{gh}} = \alpha + \beta \frac{h}{h_{stop}(\theta)} \tag{2.56}$$

Les coefficients α et β sont variables pour les différents matériaux et rugosités. Ils sont déterminés à partir des courbes dans le figure 2.12 (b). Pour les billes de verre, α est quasi nul.

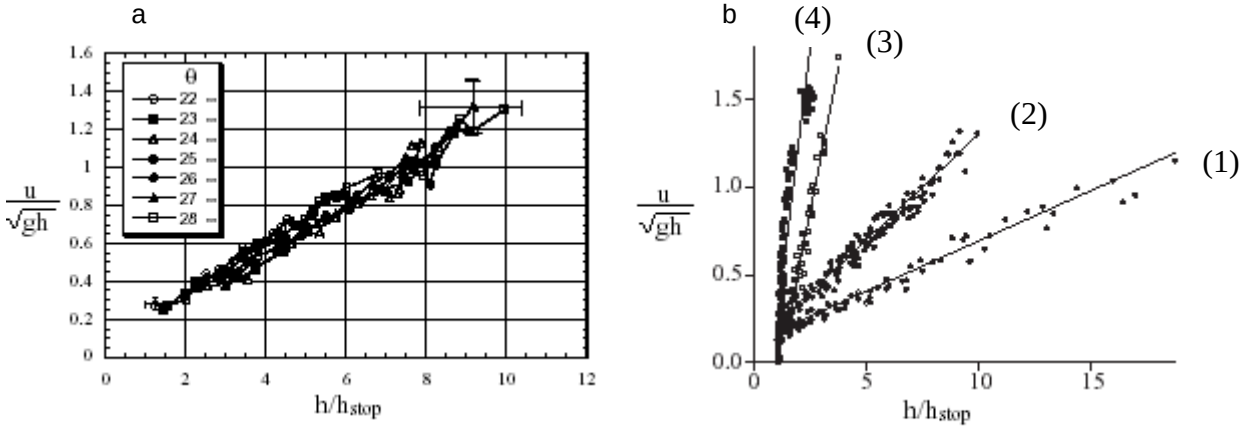


Figure 2.13 a. Nombre de Froude en fonction de h / h_{stop} pour différentes inclinaisons. b. Nombre de Froude en fonction de h / h_{stop} [Pouliquen 1999a].

Loi de frottement effective

[Pouliquen 1999a] a défini le coefficient de friction dynamique à partir de la courbe de h_{stop}. Pour chaque h_{stop}, il y a un angle critique θ_{stop} correspondant. Le coefficient de friction dynamique est donc égale à $\tan(\theta_{stop})$. C'est un coefficient fonction de la vitesse moyenne et de la hauteur d'écoulement. A l'aide de la loi d'échelle, le coefficient de friction dynamique peut s'écrire :

$$\mu(\bar{u},h) = \tan(\theta_{stop}) = \mu_{stop}(h_{stop}) = \mu_s + \frac{\mu_2 - \mu_s}{\frac{\beta h}{FrL_0} + 1} \tag{2.57}$$

$$\mu(I) = \mu_s + \frac{\mu_2 - \mu_s}{I_0 / I + 1} \tag{2.58}$$

I_0 est une constante qui dépend du matériau, pour les billes de verres, I_0 =0,3.

Modèle de Pouliquen

Le modèle de Pouliquen est en fait un développement du modèle de Savage. Ce développement consiste en une intégration du coefficient de frottement dynamique variable. Or dans le modèle de Savage, le coefficient de frottement est constant. L'équation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \alpha\frac{(h\bar{u}^2)}{\partial x} = gh\sin\theta - \mu_d gh\cos\theta - Kgh\cos\frac{\partial h}{\partial x} \tag{2.59}$$

K est le facteur de redistribution des contraintes normales dans le matériau. Les récentes simulations numériques montrent que pour un écoulement dense, K=1. μ_d est le coefficient de frottement dynamique.

Modèle de Savage amélioré

Un autre développement a été réalisé par [Josserand et al. 2005]. Dans ce modèle amélioré, les tenseurs de contraintes sont composés en deux contributions, l'une liée aux contraintes entre les grains, l'autre liée aux mouvements relatifs des grains. Le modèle permet de retrouver le profil de concentration et de vitesse dans tous les types d'écoulements cisaillés stationnaires. La pression normale des gains s'écrit :

$$\sigma_{zz} = \rho g D F(\phi)\cos(\theta) + \rho D^2 \mu_N(\phi)(\frac{\partial V}{\partial z})^2 \tag{2.60}$$

La pression tangentielle s'écrit :

$$\tau_{xz} = -signe(\frac{\partial V}{\partial z})\mu(\phi)\sigma_{zz} - \rho D^2 \mu_T(\phi)\left|\frac{\partial V}{\partial z}\right|\frac{\partial V}{\partial z} \tag{2.61}$$

ρ, D, V, ϕ sont respectivement la masse volumique des gains solides, le diamètre de grains sphériques, la vitesse moyenne et la compacité. Les coefficients $\mu_N(\phi)$ et $\mu_T(\phi)$ représentent l'intensité de pression normale et de pression tangentielle induite par le taux de cisaillement. Ils dépendent de la compacité d'écoulement. $\mu(\phi)$ est le coefficient de frottement de type Coulomb.

$$\mu_N(\phi) = \frac{\mu_{N0}}{(1-\varphi)^2} \tag{2.62}$$

$$\mu_T(\phi) = \frac{\mu_{T0}}{(1-\varphi)^2} \tag{2.63}$$

$$\mu(\phi) = \mu_0 \tag{2.64}$$

$$F(\phi) = F_0 Log\frac{1}{1-\varphi} \tag{2.65}$$

avec φ la compaction réduite :

$$\varphi = \frac{\phi - \phi_m}{\phi_M - \phi_m} \tag{2.66}$$

Ces fonctions ne sont valables que dans le régime dense où $\phi_m < \phi < \phi_M$. La compacité maximale ϕ_M signifie l'existence d'un assemblage aléatoire des grains le plus élevé. Elle est d'environ 0.8 pour les écoulements en 2D et 0,65 pour ceux en 3D. ϕ_m est la plus petite compacité compatible avec l'existence d'un réseau de contacts entre les grains. Sa valeur est de 0,7 pour les écoulements en 2D et 0,5 pour ceux en 3D. Pour $\phi > \phi_M$, le comportement de l'écoulement est celui d'un gaz où les collisions binaires jouent un rôle dominant. Pour $\phi < \phi_M$, le comportement de l'écoulement est similaire à celui d'un solide. Dans ce cas là, $\phi(z)$ reste presque constant à travers toute la profondeur.

Le profil de compacité s'écrit :

$$D\frac{d\phi}{dz} = \frac{\phi}{\frac{\partial}{\partial\phi}\left[\frac{F(\phi)}{1-(\mu_N/\mu_T)(\tan(\theta)-\mu)}\right]} \tag{2.67}$$

et celui de vitesse :

$$\left(\frac{D}{g}\right)^{1/2}\frac{dV}{dz} = -\left(\frac{F(\sin(\theta)-\mu\cos(\theta))}{\mu_T(1-(\mu_N/\mu_T)(\tan(\theta)-\mu))}\right)^{1/2} \tag{2.68}$$

Les prédictions de ce modèle sont assez compatibles avec les résultats expérimentaux pour les milieux granulaires secs dans le régime stationnaire dense.

Rhéologie de Bagnold

[Bagnold 1954] a proposé une loi de rhéologie de l'écoulement granulaire en régime inertiel. Dans le régime inertiel, l'avalanche se comporte comme un fluide parfait. La contrainte de cisaillement est proportionnelle au carré du taux de cisaillement $\tau \propto \dot{\gamma}^2$. Ce modèle est basé sur l'hypothèse d'un profil de densité constant, il est sensible aux effets de bord.

D'après l'interprétation de Naiim, la contrainte tangentielle $\tau = K_1 \rho_s \lambda^2 d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2$

Où $\lambda = 1 / \left(\sqrt[3]{\frac{c_0}{c}} - 1 \right)$, c_0 étant la concentration volumique maximale quand toutes les particules sont en contact, c la concentration en particules. ρ_s et d sont la masse volumique et le diamètre des particules. K_1 est un paramètre du matériau, pour les billes de verre, Savage et Sayed (1984) ont trouvé $K_1 = 0,03$.

La contrainte normale s'écrit : $\sigma = K_2 \rho_s \lambda^2 d^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2$

K_2 est un paramètre caractéristique du matériau. Le rapport entre K_1 et K_2 dépend principalement du coefficient de restitution du matériau e, Savage (1984) a proposé :

$\frac{K_1}{K_2} = 1.8 \sqrt{\frac{3.33(1-e)}{3\pi}}$, pour des billes de verre, ce rapport est égal à 0,56.

2.3.3 Bilan sur la dynamique des écoulements granulaire

Il a été primordial de faire cette analyse des différents modèles car leur compréhension nous a permis de mieux connaître les grandeurs qui pilotent les écoulements et ainsi comprendre quels paramètres mesurer dans les expériences que nous avons construit.

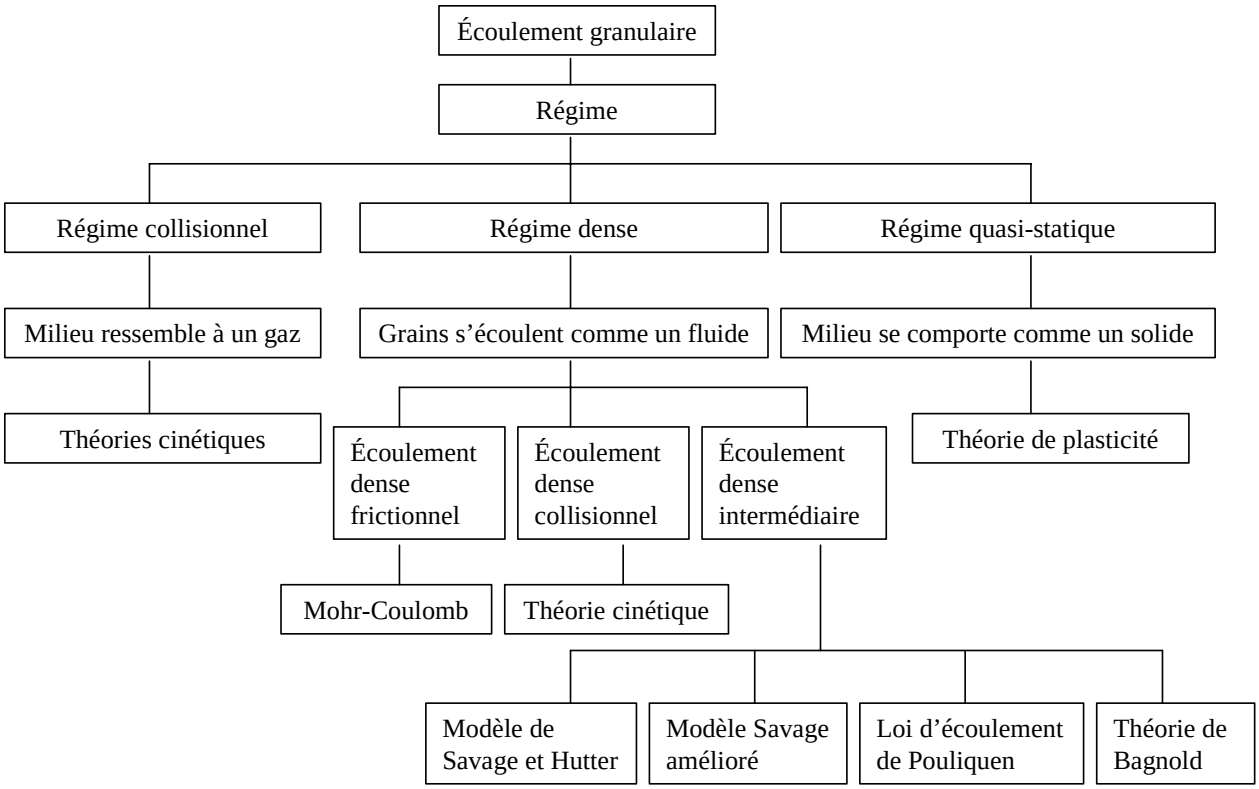


Figure 2.14 Résumé des régimes et des modèles dynamiques d'écoulement granulaire.

Chapitre 3. Mise au point des expérimentations

3.1 Introduction générale

Comme nous l'avons exposé dans le premier chapitre, la grande incertitude concernant le dimensionnement des structures de protection paravalanche provient essentiellement de la détermination des sollicitations exercées par l'avalanche de neige. La complexité de la dynamique des avalanches de neige, l'interaction entre l'écoulement et la structure et le manque de base de données sur les vrais ouvrages sont les causes principales de la méconnaissance de ces sollicitations. Le but de nos expérimentations est donc de connaître les sollicitations tangentielles et normales exercées par une avalanche de neige sur un ouvrage de galerie paravalanche, ainsi que leur variation spatio-temporelle au cours de l'avalanche.

Le programme expérimental a été mis en place après discussion au sein d'un groupe de travail du programme OPERA en 2003 [Baeza 2004]. Plusieurs types d'instrumentation ont été proposés. La première solution se composait d'un ouvrage réel équipé de capteurs de force placés au niveau des appuis entre le toit de la galerie et les poteaux de support. Cela peut permettre de mesurer les sollicitations totales subies par le toit de la structure sans perturbations sur l'écoulement. Dans ce cas, les résultats peuvent être représentatifs de l'interaction entre la structure et l'écoulement de neige en échelle réelle. Cette solution n'a pas été retenue car outre le fait qu'elle soit d'un coût élevé en moyens de mesure et en ressources humaines, il nous est apparu difficile de pouvoir tirer des conclusions à partir de ce type de mesures globales, d'où la deuxième proposition. Elle consistait à utiliser un ouvrage-capteur d'échelle intermédiaire. Une plaque inclinée instrumentée avec des systèmes de mesure a été imaginée. Elle a l'avantage de pouvoir être installée sur un site expérimental et de pouvoir être soumise à plusieurs avalanches déclenchées artificiellement chaque hiver. Après discussion avec les collaborateurs (Cemagref, CETE de Lyon, INSA de Lyon) au printemps 2005, la conception, le dimensionnement et les techniques d'installation de la plaque ont été finalisés.

Par contre, 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 pouvoir déclencher une avalanche. Le site du Lautaret ne permet pas de faire plus de cinq à six 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 para-avalanches ne peut-être étudiée 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 faudrait plusieurs années d'expériences. De plus, sur le site, il est difficile d'étudier l'impact des changements de géométries (pente du couloir, inclinaison de la plaque) et des changements de conditions initiales (vitesse, hauteur initiales).

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. Un 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 80 et 90, les travaux de Hutter et Savage sur les écoulements granulaires ont eu un certain succès

[Savage et al. 1991], [Hutter et al. 1995]. C'est aujourd'hui le modèle hydraulique le plus avancé. Les mesures sur l'avalanche de neige dense et sèche par Dent 1998 cité par [Cazie 2003] montrent que le coefficient de frottement dynamique (le rapport entre la force normale et la force tangentielle) est indépendant de la vitesse. C'est un comportement typique des écoulements granulaires.

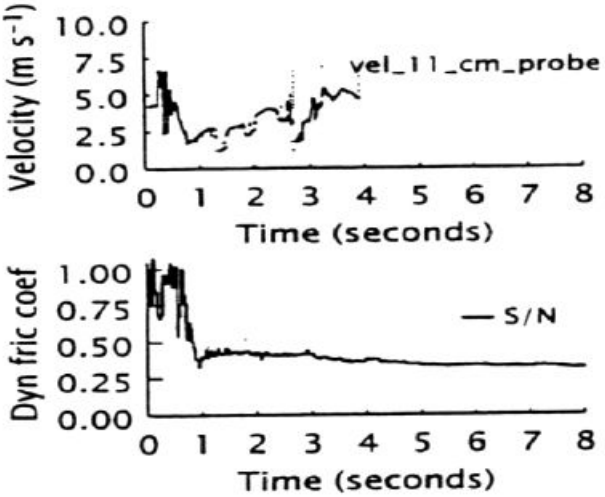


Figure 3.1 Vitesse et coefficient de frottement dynamique en fonction du temps cités par [Cazie 2003].

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

Nous allons d'abord présenter dans le paragraphe 3.2 la mise au point de l'expérimentation sur les écoulements granulaires dans un canal incliné.

La mise au point de l'expérimentation au Lautaret sera présentée dans le paragraphe 3.3.

3.2 Expérimentation sur les écoulements granulaires dans un canal incliné

3.2.1 Développement de l'expérimentation

3.2.1.1 Dimensionnement du canal

Le modèle réduit est basé sur des écoulements granulaires dans un canal incliné. Le canal est constitué de deux parties. La première partie est constituée d'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 constituée d'un canal peu incliné (canal inférieur) et il représente les structures de galerie paravalanche sollicitées par l'écoulement (voir figure 3.2). Pour passer d'une échelle réelle à un modèle réduit en laboratoire, certaines lois de similitudes doivent être respectées. Le nombre de Froude $Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}}$ est souvent utilisé dans le cas de similitude d'écoulement. Ainsi nous avons cherché à conserver le même ordre de grandeur. Pour l'avalanche de neige, le nombre de Froude est souvent compris entre 1 à 10 [Cazie 2003]. D'après les travaux précédents [Platzer 2004] [Hutter et al. 1995], l'écoulement granulaire dans un canal incliné a une vitesse moyenne de l'ordre de 1 à 4 m/s selon différents angles d'inclinaison du canal. En considérant ces deux éléments, nous avons déterminé les dimensions du canal.

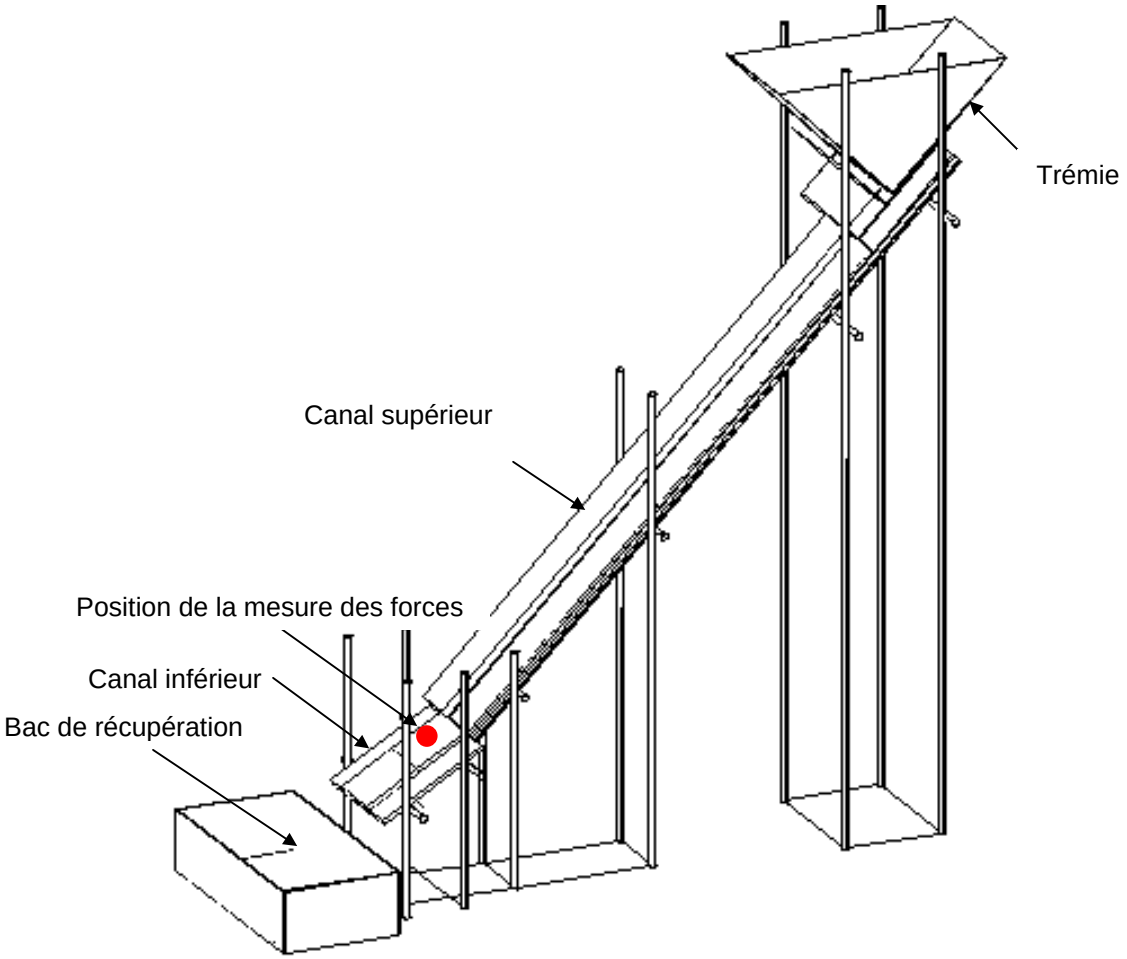


Figure 3.2 Schéma simplifié du dispositif expérimental

Canal supérieur

Le canal supérieur a une longueur totale de 6 mètres. Il est formé de deux parties, la partie supérieure d'un canal en PVC gris opaque de 4 mètres, et la partie inférieure d'un canal de 2 mètres en PVC transparent. La partie aval en PVC transparent nous permet d'effectuer des mesures sur l'écoulement juste avant la rupture de pente. Deux profilés métalliques sont installés en dessous pour 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 3.3). Le canal peut être incliné entre 0° et 45°.

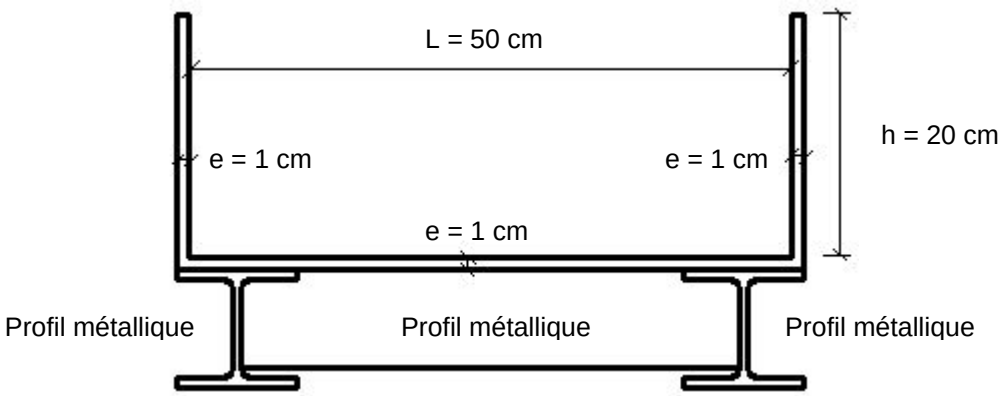


Figure 3.3 Schéma simplifié de la section du canal supérieur

Canal inférieur

Le canal inférieur est constitué d'une plaque et de deux joues latérales transparentes et démontables. La plaque inférieure fait 1 mètre de largeur et 2 mètres de longueur. Les joues latérales ont une hauteur de 0,3 mètres et elles ont été découpées pour venir dans l'alignement du canal supérieur. La section transversale est montrée dans la figure 3.4. Le capteur qui mesure les efforts est placé dans une ouverture effectuée dans la plaque constituant le fond du canal. Les caractéristiques du capteur et la méthode de mesure sont présentées en détail au § 3.2.3.4. La partie sensible du capteur vient affleurer le fond du canal, au même niveau que celui-ci.

Les positions 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 de changer facilement l'angle du canal. Selon la nécessité, l'inclinaison du canal inférieur est prévue de varier entre 0° et 20° par rapport au niveau horizontal.

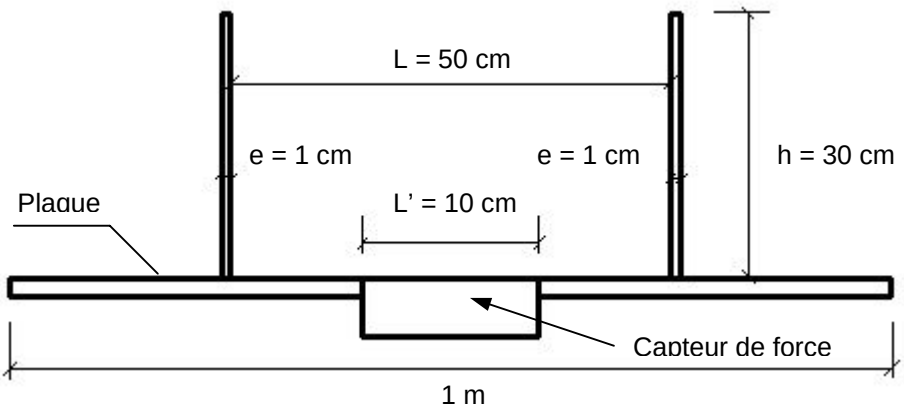


Figure 3.4 Schéma simplifié de la section du canal inférieur.

3.2.1.2 Système de transfert des billes et système d'ouverture

Une trémie d'une capacité de 1000 *l* est alimentée en billes de verre par une centrale d'aspiration.

Une porte d'ouverture a été installée 1 mètre en aval de l'extrémité haute du canal. La distance de 5 mètres avant la rupture de pente permet d'éviter que la zone de perturbation de l'écoulement dû à la sortie de la trémie ne vienne perturber les mesures. Le canal en amont de la porte est obturé une plaque de contre-plaqué, à l'exception d'une petite zone permettant l'entrée des billes, dont l'ouverture est variable et permet de contrôler l'épaisseur initiale de l'écoulement. La sortie de la trémie et la partie du canal ouverte sont liées par une jupe plastique étanche. Pour la porte nous avons rencontré des difficultés du fait de la pression due au poids des billes qui rend difficile l'ouverture manuelle de la porte. Le moindre blocage de la porte pendant l'ouverture peut facilement modifier le comportement de l'écoulement. Par conséquent, nous avons développé un système d'ouverture constitué d'une porte métallique reliée à une charnière sur sa partie haute et d'un puissant ressort de rappel en partie basse. Le blocage de la porte, qui s'effectue sous tension du ressort de rappel, est assuré par un ergot métallique. Cet ergot libère la porte qui pivote brutalement autour de la charnière haute, les billes sont alors presque instantanément libérées. Un interrupteur relié à l'ergot et au système d'alimentation électrique est installé en dessous du canal. Celui-ci permet de mettre en route le système d'alimentation et les lampes en aval du canal d'allument. Cela nous permet de connaître le temps initial de déclenchement, qui est un paramètre très utile pour les simulations numériques.

En aval du canal inférieur, deux conteneurs métalliques sont installés en parallèles pour recevoir les billes.

Figure 3.5 Système de transfert des billes : a. Trémie et canal supérieur b. Bac de récupération.

3.2.1.3 Matériau granulaire utilisé

Pour simuler les avalanches de neige dense, nous avons déjà évoqué la possibilité d'utiliser comme matériau modèle de la neige des billes de verre. Mais il reste encore à caler les dimensions de ces billes. Le choix de la taille des billes est lié à deux effets :

- Effet de bord sur le canal
- Effet électrostatique

a). Limitation par les effets du bord :

L'objectif est de limiter les effets de bord sur le canal car le frottement entre les billes et les parois n'est pas négligeable. Mais cet effet diminue avec l'augmentation de la largeur du canal et avec la diminution de la taille des billes. Généralement il est possible de considérer que l'effet de bord n'influence plus le cœur d'écoulement lorsque la largeur de canal est supérieure à 600d (d étant le diamètre de billes) [Jop et al. 2005]. Dans notre cas, la largeur du canal est de 50 cm. Le diamètre de bille doit donc être inférieur à 833 μm .

b). Limitation par les effets électrostatiques :

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 μm , Thierry Faug propose au moins 300 μm [Faug 2004].

En considérant ces deux éléments, nous avons choisi des billes de verre dont la taille est comprise entre 300 μm et 800 μm . Une granulométrie laser a été effectuée sur le matériau, le résultat de la distribution de la taille des billes est montré dans le tableau 3.1. La masse volumique a été également mesurée et nous avons obtenu 2348 kg/m^3 pour la masse volumique absolue et 1637 kg/m^3 pour la masse volumique apparente. La compacité est donc égale à 0,7. Des essais triaxiaux menés au laboratoire 3SR ont permis d'estimer l'angle de frottement à 28,8°.

Taille (μm)	Résultat > (%)	Résultat Cumulé (%)
796	3,29	3,29
632	30,82	34,12
502	53,90	88,02
399	10,07	98,08
317	1,44	99,52
252	0,39	99,91
200	0,08	99,99
159	0,01	100,00

Tableau 3.1 Distribution de la taille des billes.

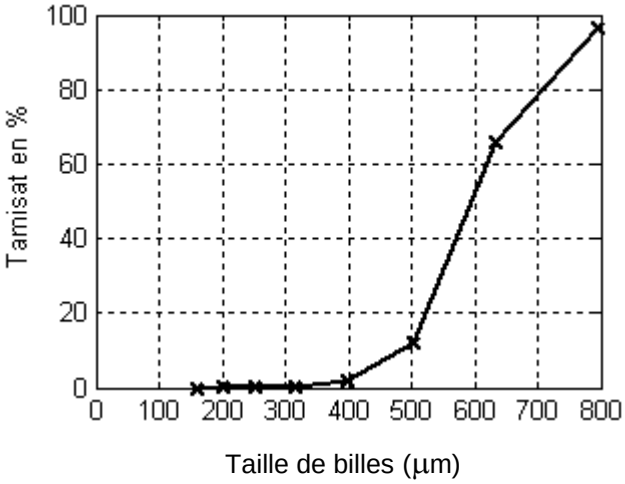


Figure 3.6 Courbe Granulométrique des billes de verre.

3.2.1.4 Rugosité

Un des objectifs de notre étude est de mesurer l'effort tangentiel et le coefficient de frottement dynamique dans des conditions les plus proches possibles d'un écoulement réel. Ainsi nous avons choisi de placer du papier de verre entre l'écoulement et le fond du canal pour générer la création d'une couche limite (la vitesse est nulle au fond du canal) ce qui permet de retrouver les modes de rupture courant rencontrés pour des avalanches de neige. Ceci a été fait sur toute la surface inférieure du canal pour éviter d'avoir un changement de mode d'écoulement lors d'un déclenchement.

La taille de grains sur le papier de verre est similaire à celle des billes de verre. A priori, il est ainsi possible de considérer que l'angle de frottement au fond du canal et l'angle de frottement interne du matériau sont équivalents.

3.2.1.5 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 h_i et la position du capteur de force par rapport au bord du canal *Li* (voir figure 3.7). Nous n'étudierons pas l'influence de la quantité de billes initiale (impossibilité d'évaluer correctement cette quantité avec notre système de remontée des billes). Elle reste à une valeur constante d'environ une tonne pour chaque essai. Les paramètres ajustables et leurs variations sont listés dans le tableau 3.2.

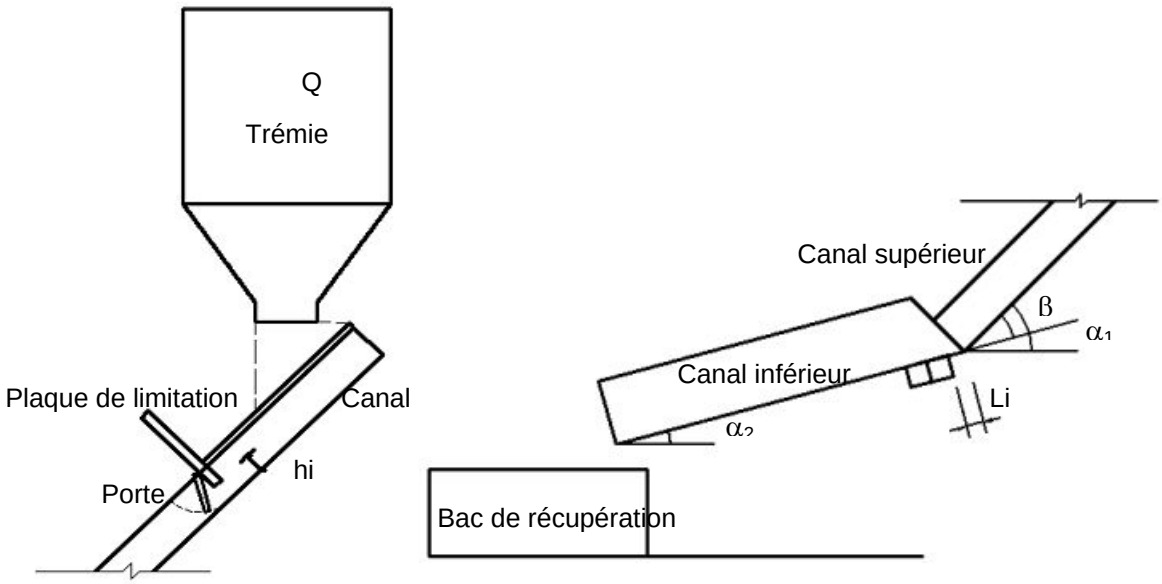


Figure 3.7 Schéma simplifié des paramètres ajustables.

Paramètre	Variation
hi (cm)	10, 15, 20
α_1	43°, 36°
α_2	15°, 20°
Li (cm)	0, 5, 15, 25

Tableau 3.2 Valeurs de la variation des paramètres ajustables

3.2.1.6 Grandeurs physiques à mesurer

Notre but est de connaître les sollicitations exercées par les différents types d'écoulements à la rupture de pente et leurs variations spatio-temporelles. Les premières grandeurs physiques importantes à mesurer sont donc les efforts normaux et tangentiels dans la partie du canal inférieur. Afin de valider les calculs des pressions sur la structure, les caractéristiques de l'écoulement (vitesse, hauteur, densité) avant et après la rupture de pente sont également importantes. Les positions et méthodes de mesure sont schématisées dans la figure 3.8. Les mesures en amont se trouvent à environ 50 cm de la rupture de pente et celles en aval suivent la position du capteur de forces.

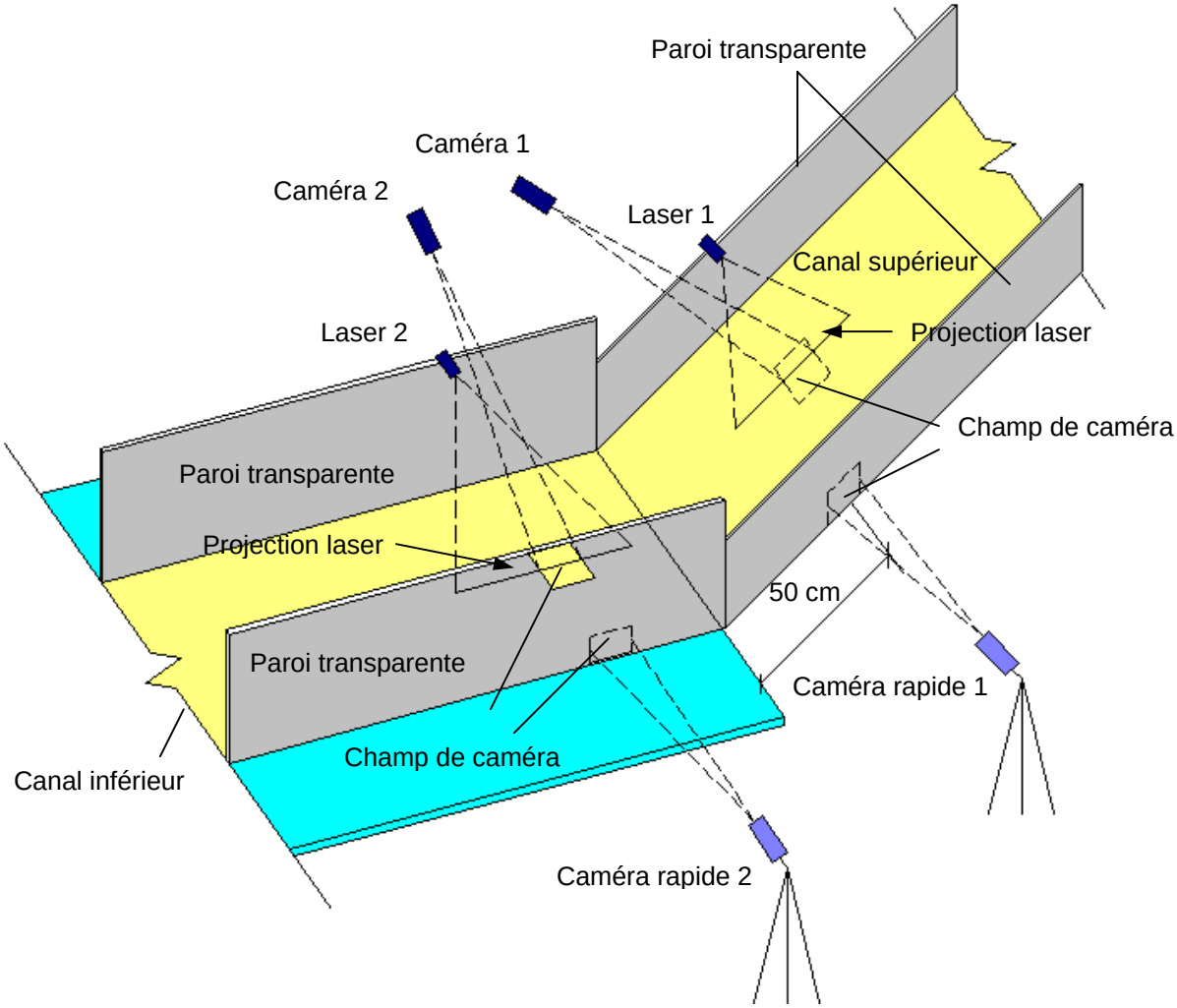


Figure 3.8 Schéma simplifié de l'installation typique des méthodes de mesure des grandeurs physiques.

3.2.2 Mise au 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 préliminaires. Les conditions initiales de ces essais sont les suivantes : 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 600 litres. Le centre du capteur de force est positionné 6 cm à partir de la rupture de pente. L'ouverture initiale a été testée à 10 cm, 15 cm et 20 cm. Nous allons présenter précisément dans les paragraphes suivants les méthodes de mesure de chaque paramètre.

3.2.2.1 Hauteur de l'écoulement

Principe de la mesure et matériels utilisés

Un faisceau laser et une caméra ont été utilisés pour mesurer l'épaisseur de l'écoulement. Le principe de cette méthode a été proposé et utilisé par [Daerr 2002]. Un faisceau laser avec un certain angle par rapport au plan de mesure produit une ligne de lumière qui se décale latéralement quand elle rencontre des objets. La distance de décalage de la ligne dépend de l'angle d'incidence de faisceau laser et de l'épaisseur de l'objet. Quand l'angle d'incidence du laser et la distance de décalage de la lumière sont connus, l'épaisseur de l'objet peut être facilement déduite. Pour un objet donné (épaisseur fixée), plus l'angle d'incidence de la lumière laser est rasant (α petit), plus la distance de décalage est importante, la précision de mesure est donc plus élevée. Mais en même temps, la ligne de laser devient plus large et floue, ce qui peut diminuer en retour la précision de mesure et compliquer l'analyse d'images.

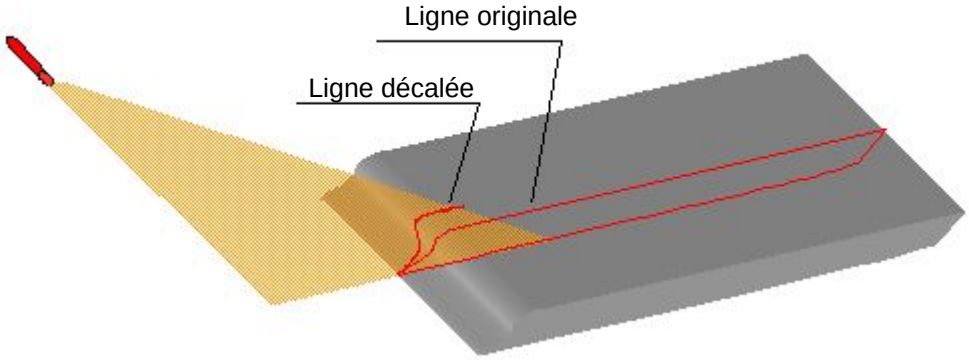


Figure 3.9 Décalage du faisceau laser en cas de rencontre d'un objet.

Dans notre cas, nous n'avons pas choisi d'avoir un angle précis à chaque essai, mais nous avons préféré utiliser une cale d'épaisseur connue pour calibrer l'échelle de décalage à chaque expérience. La cale est constituée de trois blocs en bois identiques d'une épaisseur de 10 mm. Quand la projection du faisceau laser rencontre la cale, elle est décalée de trois distances différentes L1, L2, L3 qui correspondent respectivement à 1 cm, 2 cm et 3 cm d'épaisseur. (Voir figure 3.10). Les distances sont comptées en nombre de pixels sur les images issues de la caméra. Une équivalence entre pixel et centimètres est ensuite déduite. Cela permet de convertir par la suite les distances de décalage du faisceau en épaisseur d'écoulement. Après chaque réglage, la position de laser doit être fixée et maintenue jusqu'à la fin d'essai. Le moindre mouvement de laser peut conduire à une modification de la conversion d'unité et influencer les résultats.

La caméra doit être placée perpendiculaire du plan du canal pour éviter la déformation des images. Le champ d'image doit être bien réglé. Si le champ est trop petit, la ligne de laser va se décaler hors du champ. Au contraire, si le champ est trop grand, la précision de calcul va diminuer. Nous avons utilisé une caméra standard d'une vitesse de 24 images/s. Les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus avec la caméra rapide. Une caméra normale est donc suffisante pour mesurer l'épaisseur de l'écoulement.

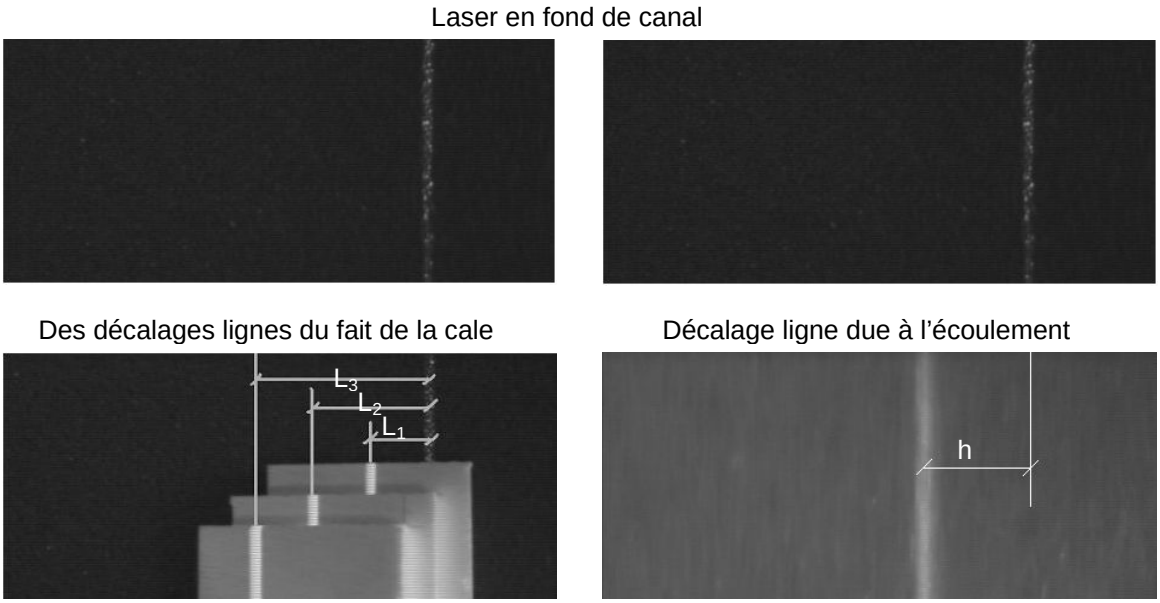


Figure 3.10 Principe de mesure de la hauteur de l'écoulement.

Traitement numérique

La durée des écoulements est normalement d'une dizaine de secondes, nous avons donc des centaines 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 pour calculer automatiquement les hauteurs en fonction du temps.

L'idée est de rechercher la position de la ligne du laser (ligne blanche) pour chaque image par les différentes valeurs de niveau de gris (0-255 dans un fichier image 8 bits). La ligne blanche est donc distinguée par les valeurs de gris les plus élevées. Un calage numérique de cette valeur de niveau de gris est nécessaire à cause de la variation des conditions d'éclairement. Nous extrayons 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. La hauteur réelle est retrouvée enfin en reprenant le calibrage exécuté avant essai.

3.2.2.2 Profil de vitesse

Pour arriver à déterminer le profil de vitesse de l'écoulement granulaire, nous avons fait un enregistrement avec des caméras rapides des parois du canal. Un traitement par la méthode PIV nous permet de suivre au cours du temps le nuage des particules et ainsi de déterminer les profils de vitesse latéraux. En l'absence d'autres méthodes, nous considérons que les effets de bords sont suffisamment négligeables pour que la mesure des vitesses ainsi réalisée soit représentative de l'écoulement.

Présentation générale de la méthode PIV

La PIV (Particle Image Velocimetry) est une méthode basée sur le traitement numérique des images de particules en forte concentration 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.

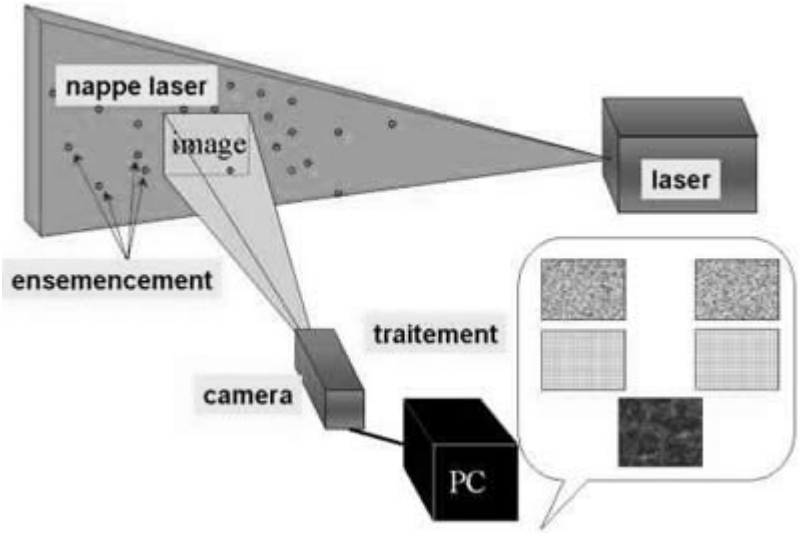


Figure 3.11 Schéma simplifié de la méthode PIV extrait du [Site ONERA].

La procédure de la méthode PIV est maintenant exposée (extrait du site [Recherches en aéroacoustique et aérodynamique] (http://c.noger.free.fr/Francais/piv_2d_fr.php)).

a. Ensemencement

Les particules étrangères (traceur) sont ensemencées dans le fluide transparent. Les vitesses de ces particules en suspension dans le fluide sont ensuite mesurées. Les mouvements des particules représentent le mouvement global du fluide. La taille des particules traceur doit être assez petite pour ne pas perturber l'écoulement mais à la fois suffisamment grosse pour être observée. Dans notre cas, les particules sont l'écoulement lui-même, donc le problème ne se pose pas.

b. Plan lumineux

La PIV 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, un laser à impulsions et un système optique (composé de lentilles cylindriques ou sphériques) qui transforme le faisceau laser en une nappe de faible épaisseur sont souvent utilisés. Dans notre cas, seul les plans latéraux sont accessibles, et la caméra rapide dispose d'un système d'obturateur qui permet de ne recevoir la source lumineuse que pendant un temps très court à chaque déclenchement (une fraction de milliseconde). Nous éclairons donc en continu la paroi latérale du canal pour obtenir le même effet que décrit dans la méthode PIV.

c. Acquisition et traitement des images numériques

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

- Subdivision de l'image entière (ou extrait seulement) en plusieurs zone d'interrogation. Au centre de chaque zone d'interrogation, un vecteur vitesse sera calculé.
- Calcul du champ d'intensité (luminosité des pixels) de l'image à l'instant t et $t+\Delta t$ pour chaque zone d'interrogation.
- Calcul de la corrélation entre les champs d'intensité d'image pour un intervalle entre deux images et tous les décalages possibles entre les deux zones d'interrogation.
- Une fonction de cross-corrélation est ensuite construite à partir des valeurs de corrélation de tous les intervalles entre images.
- Le déplacement le plus probable pour un intervalle donné est celui pour lequel la fonction de corrélation a la valeur la plus élevée.
- La même procédure est appliquée 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. Chaque paire d'images est enregistrée sur le 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.

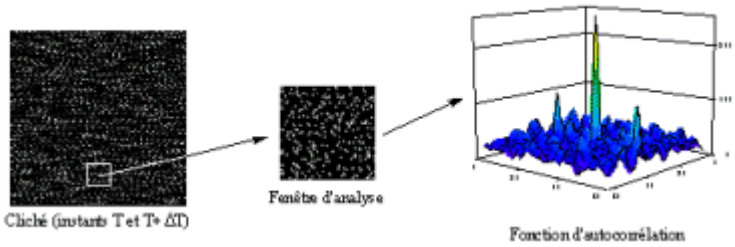


Figure 3.12 Méthode d'auto corrélation.

- 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 ci-dessous. 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.

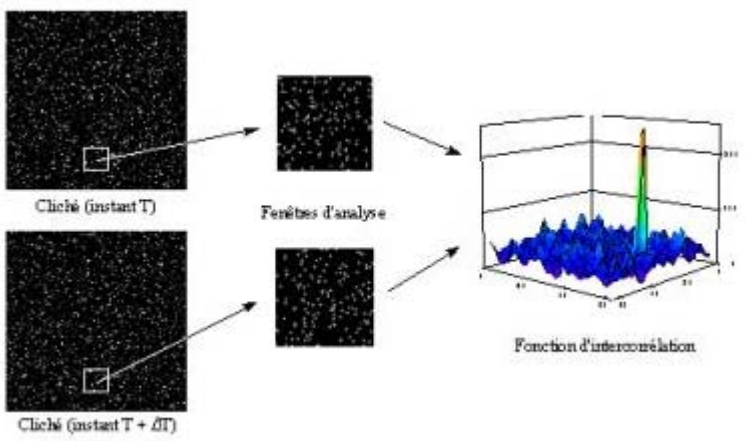


Figure 3.13 Méthode d'inter corrélation.

d. Traitement des vecteurs de déplacement

La PIV donne les mesures instantanées, il est donc possible que les résultats de certaines régions n'aient aucune signification physique. Il est nécessaire de calculer un champ de vecteur moyen sur une séquence d'image donnée ainsi que ses propriétés statistiques comme l'écart type et le coefficient de corrélation. 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. Souvent au moins une dizaine d'images est nécessaire.

Les erreurs de la méthode PIV sont généralement les suivantes :

- Reflets fixes de l'environnement du laboratoire (lumière, objectifs etc..) qui leurrent le logiciel de calcul de la fonction de corrélation.
- Mouvements perpendiculaires au plan d'image pour une mesure en 2D.
- Variations du gradient de déplacement dans une zone d'interrogation (taille de la zone d'interrogation est trop grande).
- Angle entre le plan observé et la caméra n'étant pas égal à 90°.
- Distorsion à cause de l'utilisation de focales courtes ou de petites distances entre la caméra et le plan d'observation

Méthode PIV pour l'écoulement granulaire

Comme évoqué précédemment, pour les matériaux non transparents comme certains matériaux granulaires, l'utilisation d'une tranche de lumière laser n'est pas possible. Ici, 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 sur les parois du canal.

Billes colorées ou non colorées

D'après le travail de thèse d'Adrian Daerr [Daerr 2000], la meilleure solution pour faire de la PIV avec l'écoulement de billes de verre est de colorer 1% de billes avec de l'encre de chine.

Le travail de [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 ou peu les résultats de la méthode 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 le traitement des images.

Un éclairage puissant (projecteur halogène 500 watts) a d'abord été utilisé. Avec cet éclairage, nous avons obtenu des images de bonne qualité. 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 du tout.

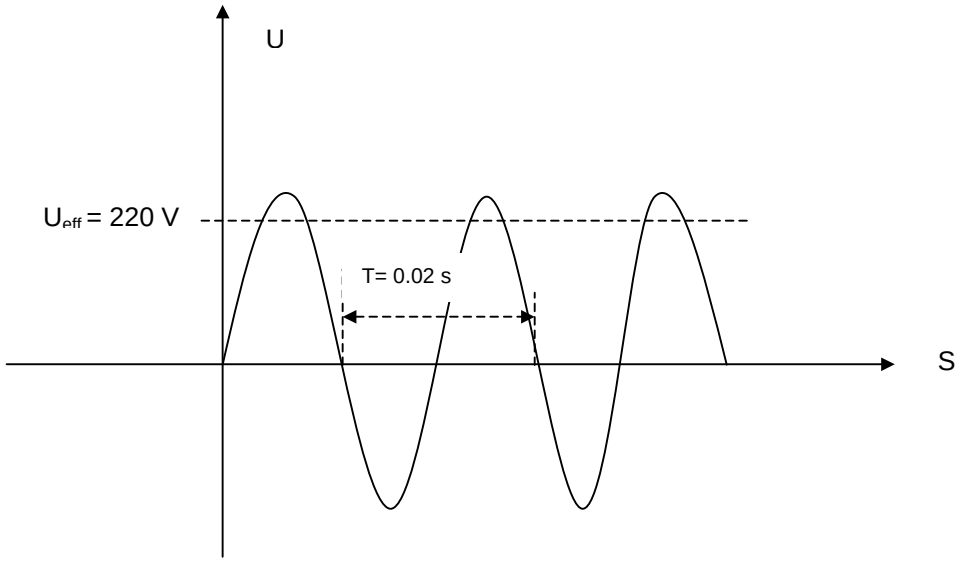


Figure 3.14 Courant alternatif.

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 220 V (U_{eff}) avec une période de 0,02 s soit une fréquence de 50 Hz (voir figure 3.14). Ainsi, l'intensité de la lumière varie selon la tension appliquée au filament chauffant. Le courant devient nul à chaque 0,01s. Cette tension nulle ne coupe pas complètement l'émission de lumière du fait de l'inertie thermique du filament mais provoque une baisse importante de l'intensité.

Dans notre cas nous utilisons une caméra rapide à 1000 images par seconde pour obtenir une bonne précision sur les vitesses. Or à cette fréquence nous percevons nettement les fluctuations de la source lumineuse. Ceci a été confirmé par un enregistrement sur des billes au repos avec la caméra rapide. La valeur moyenne du niveau de gris de chaque image est ensuite calculée (0 = noir, 255 = blanc). Après une séquence d'images successives moyennées, en comparant ces valeurs, nous avons retrouvé l'effet d'impulsion du courant alternatif. La figure 3.15 montre le niveau de gris absolu (la différence entre le niveau de gris

et le niveau de gris moyen) en fonction du temps, la forme et la période du courant alternatif sont clairement observés.

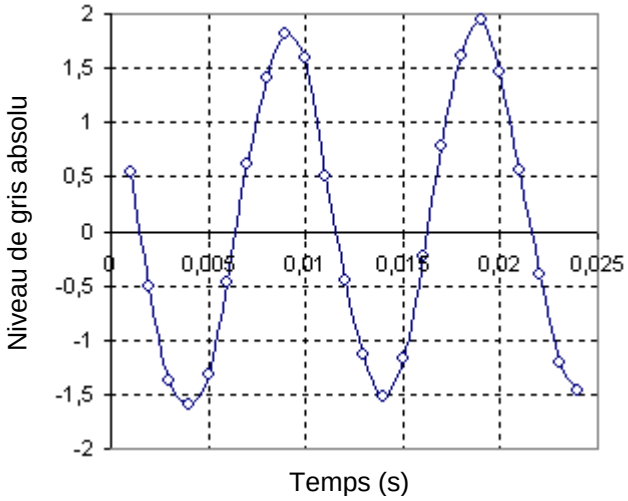


Figure 3.15 Variation du niveau de gris des images en statique, éclairées avec une source lumineuse alimentée en courant alternatif.

Ces fluctuations gênent l'analyse d'images, non seulement en PIV, mais aussi pour le calcul de la compacité des billes en mouvement comme nous allons le voir. La solution retenue consiste à éclairer le champ de caméra avec une source lumineuse alimentée en courant continu.. Théoriquement il n'existe plus d'effet d'impulsion. Les erreurs de traitements numériques dues à la qualité des images peuvent être diminuées.

Nous avons choisi des diodes blanches, qui ont une grande valeur d'intensité de lumière, alimentées avec une tension continue de 12 V. Le même test que précédemment a été effectué et les résultats sont montrés dans la figure 3.16. 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 beaucoup moins importantes que dans le cas précédent, et très aléatoires. Ces fluctuations peuvent être dues au bruit numérique de la caméra qui est inévitable.

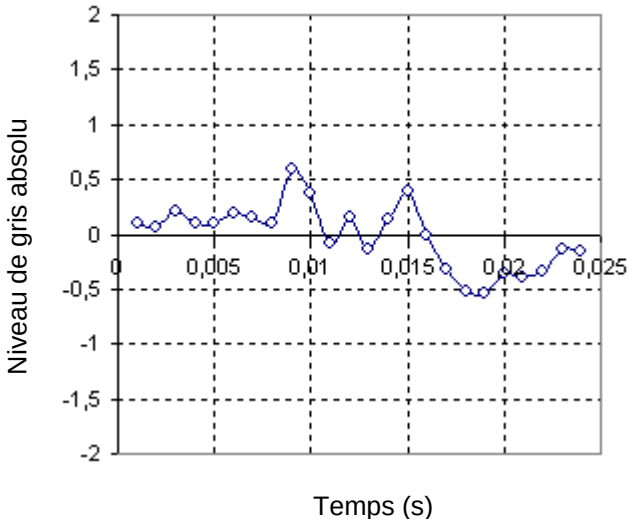


Figure 3.16 Variation du niveau de gris des images en statique, éclairées avec une source lumineuse alimentée en courant continu.

Caméras rapides

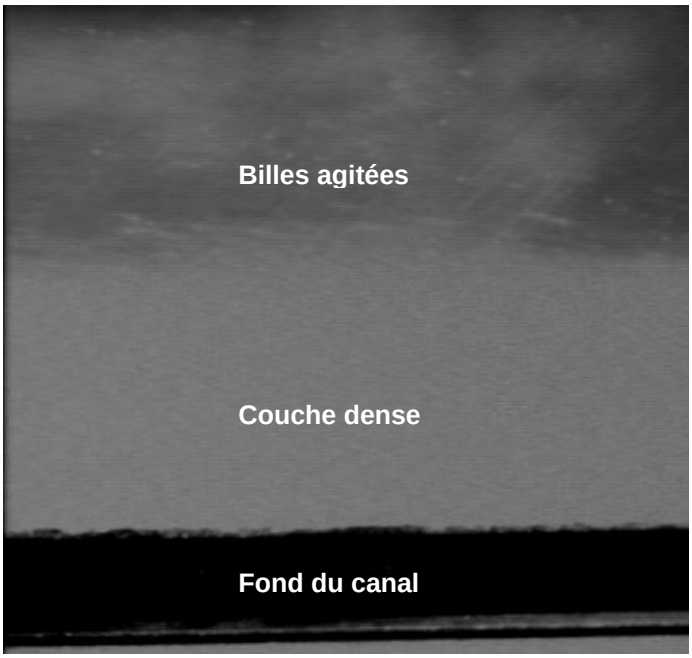
Deux caméras rapides identiques ont été utilisées pour enregistrer le profil d'écoulement. Les caractéristiques principales des caméras sont données dans le tableau 3.2.3 :

Caractéristique des bases de donnée de caméra	
Capteur	CCD Pixel carré (7,4 μm* 7,4 μm)
Méthode d'enregistrement	Mémoire embarqué
Capacité d'enregistrement	128MB : 544 images pleines format (2,2 s) 256MB : 1087 images pleines format (4,3 s) 384MB : 1631 images pleines format (6,5 s) 512MB : 2175 images pleines format (8,7 s)
Résolution	Plein Format: 512*480 Pixels
	Autre Format : 512*240 ; 256*240 ; 256*120 ; 128*120 ; 128*80 ; 128*32 Pixels
Niveau de gris	Monochrome : 256 Pas
Température d'ambiance	0 à 40 °

Tableau 3.2.3 Caractéristiques principales des caméras ultra-rapides utilisées.

Le paramètre 'Résolution' représente la taille de l'image et elle est très dépendante de la vitesse d'acquisition. Par exemple, pour une vitesse de 250 images/s, la résolution maximale de l'image est de 512*480 pixels (figure 3.17 a). Elle passe à 256*240 pixels pour une vitesse de 1000 images/s (figure 3.17 b).

a. Plein format de 512*480 pixels



b. Format de 256*240 pixels

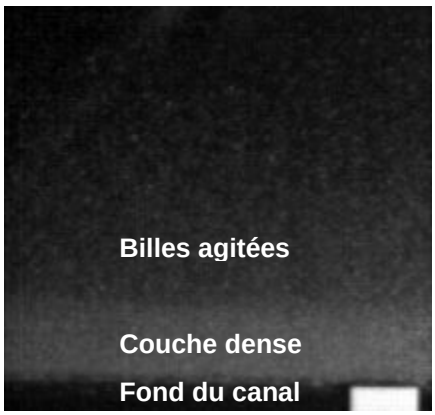


Figure 3.17 Différentes résolutions d'image à différentes fréquences d'acquisition (images à l'échelle, éloignements de la caméra différents).

Sur la figure 3.17 a, la partie plus claire représente une couche dense de l'écoulement. Dans cette couche, il est difficile de distinguer les particules individuelles. A la "surface libre" où

l’écoulement est beaucoup moins dense, quelques billes et quelques traits de déplacements de 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 peu 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. Cela est du à la vitesse de passage des particules qui ne permet pas de les suivre correctement.

Nous avons ensuite augmenté la vitesse de caméra à 1000 images/s (figure 3.17 b). Pour 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, il faut donc éloigner la caméra. Malgré tout, la qualité de ces images est meilleure que les images précédentes et elles peuvent être analysées avec WIMA correctement.

Logiciel WIMA

WIMA est un logiciel de traitement d’image, développé sous le langage C/C++ par le laboratoire de traitement du signal et instrumentation de Saint Etienne en 1992 [Ducottet 1992]. Un langage de macro-commandes, intégré au logiciel permet d’automatiser les traitements.

Procédure du module PIV sous WIMA

Nous citons un exemple de traitement pour décrire la procédure de calcul PIV sous WIMA :

- Une séquence d’images successives que nous souhaitons traiter est d’abord choisie (figure 3.18 a).

- Ensuite, nous définissons la taille et la période de la zone d’interrogation (figure 3.18 b). La taille de la zone d’interrogation correspond à la surface à partir de laquelle le principe d'auto corrélation décrit précédemment 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 32*32 ou 16*16 pixels.

- Après définition de ces deux paramètres, le calcul est effectué à l'aide du module PIV qui calcule les vecteurs de déplacement entre deux images. Les vecteurs de déplacement moyens sur toute la séquence d’images peuvent également être calculés (figure 3.18 c), ainsi que les écarts types (figure 3.18 d).

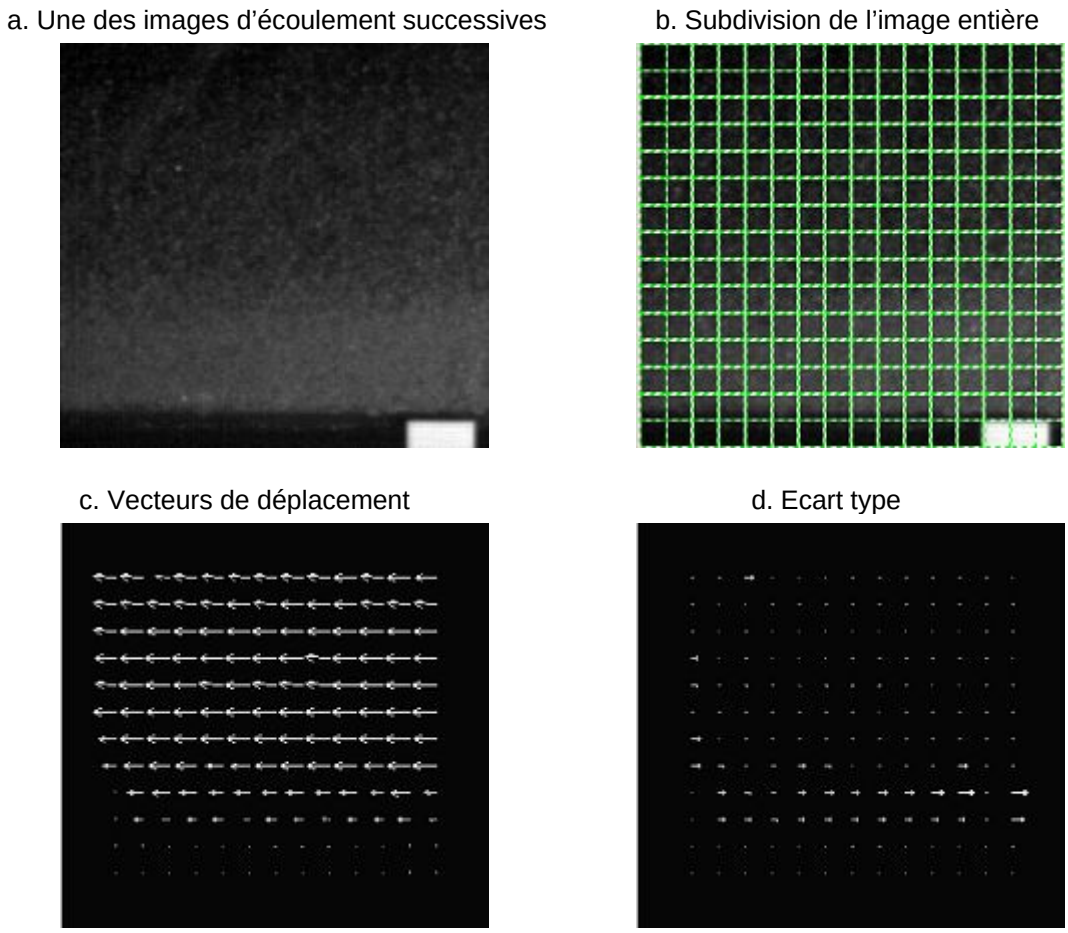


Figure 3.18 Procédure du calcul PIV sous WIMA.

Calcul de la vitesse

WIMA nous permet d'obtenir les vecteurs de déplacement dans chaque zone d'interrogation entre deux images successives notés Δd (en pixels). Le temps d'intervalle entre deux images, noté Δt, est l'inverse de la vitesse de caméra. La vitesse est enfin déterminée par $\Delta d/\Delta t$, en pixels par seconde, il ne reste alors qu'à convertir cela pour obtenir des m/s (via une échelle filmée dans les mêmes conditions par exemple).

Comme évoqué précédemment, il est nécessaire de calculer le vecteur moyen sur une séquence d'images pour lisser les résultats. Le nombre d'images à moyenner dépend principalement des caractéristiques de l'écoulement. Pour un écoulement rapide avec une vitesse de l'ordre de quelques mètres par seconde, les vecteurs de déplacement ne peuvent pas être trop moyennés, car cela peut conduire à perdre les informations sur l'écoulement. Dans notre cas, nous avons défini le nombre d'images à moyenner à 10 ce qui correspond à une durée de 0,01s. Les vecteurs de déplacement moyennés dans le temps à chaque niveau de hauteur sont ensuite moyennés suivant la largeur de l'image. Nous obtenons enfin le profil de vitesse moyenné dans un petit espace et durant un petit laps de temps. La figure 3.19 montre un exemple de résultat d'un essai avec une ouverture de porte initiale de 10 cm. Les incertitudes sont calculées à partir des écarts types donnés par WIMA.

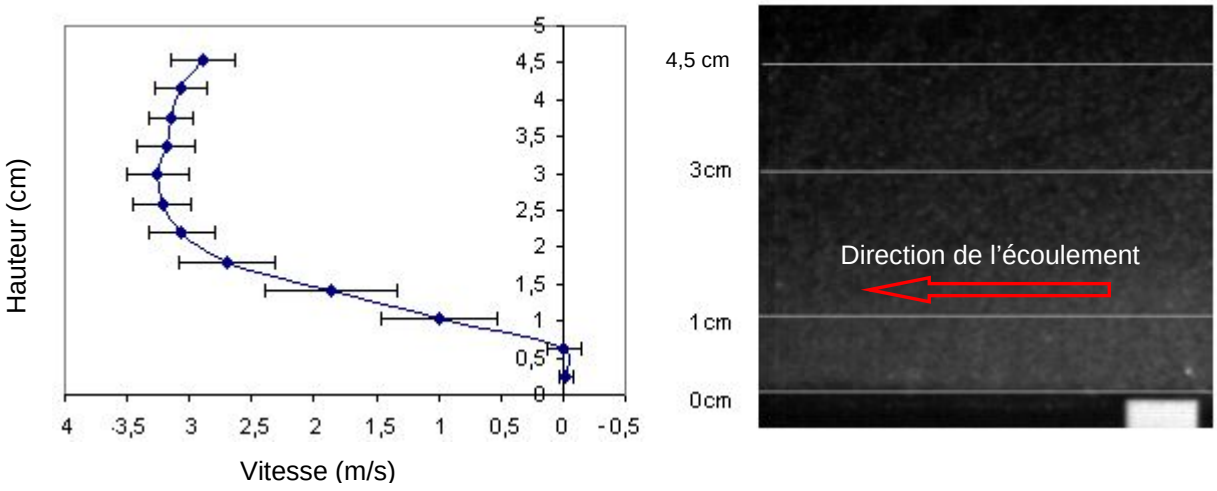


Figure 3.19 Exemple du calcul du profil de vitesse (essai avec une ouverture initiale de 10 cm).

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

En plus des sources d'erreur générales de la PIV pour les fluides transparents, il existe d'autres erreurs lorsque la PIV est appliquée aux écoulements granulaires. Parmi ces erreurs, il y'a le reflet des billes de verre dû à l'éclairage. Des billes brillantes dans l'écoulement apparaissent aléatoirement, résultat de leur position par rapport à la source lumineuse. Entre deux images consécutives, la position des billes brillantes est presque aléatoire. Les billes brillantes peuvent donner des fausses informations pour le logiciel et perturber le calcul de la corrélation entre les images. Le reflet des billes est lié à l'angle d'éclairage et la distance entre la caméra et le plan d'observation. En réglant ces paramètres, nous diminuons ce phénomène mais sans l'éliminer. En conséquence, nous avons écrit une macro sous WIMA pour seuiller la luminosité de ces billes brillantes. Le traitement des images s'en trouve nettement amélioré. Un exemple de ce traitement peut être vu sur les figures 3.20 a et b.

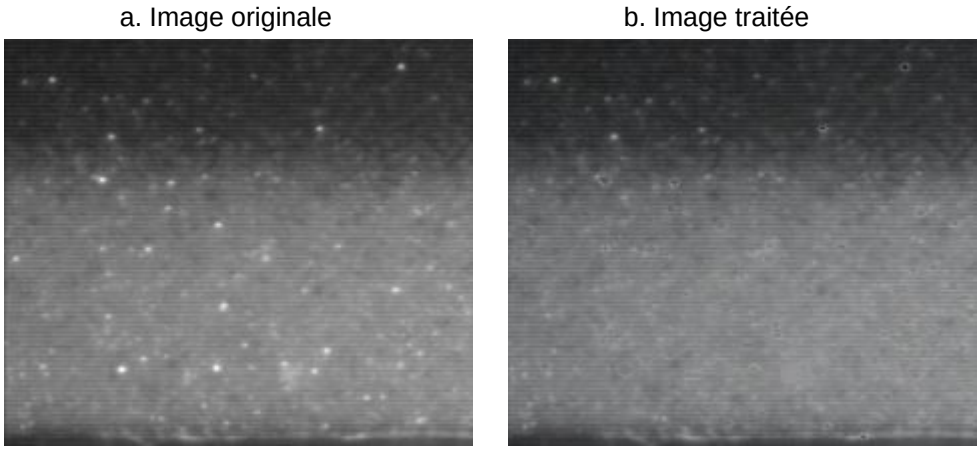


Figure 3.20 Traitement du reflet des billes.

3.2.2.3 Densité apparente de l'écoulement

Il existe relativement peu de méthodes pour obtenir la densité apparente dans un écoulement granulaire. Nous pouvons cependant citer les méthodes de [Louge et al. 1997] et de [Barbolini et al. 2005].

Dans notre cas, seule la méthode de [Barbolini et al. 2005] semble applicable car elle ne nous contraint pas à utiliser des sources radioactives ou des moyens de traitement trop lourds incompatibles avec le nombre d'expériences que nous envisageons. La méthode retenue consiste à corréler le niveau de gris des images avec la densité apparente du mélange granulaire.

Calcul du profil de niveau de gris.

D'après les images filmées à travers la paroi transparente, nous avons constaté que la concentration de l'écoulement est corrélée aux différentes valeurs de niveau de gris. La partie la plus claire ayant une valeur de niveau de gris élevée correspond à la partie d'écoulement dense. La partie sombre ou noire qui a une valeur du niveau de gris basse correspond à la partie d'écoulement diluée ou sans billes (Figure 3.21). Nous avons extrait par un programme les valeurs de niveau de gris de chaque pixel dans chaque image (format BMP). Pour obtenir plus facilement les valeurs de niveau de gris de chaque pixel sur une image, nous avons d'abord transformé le format d'image de BMP à PGM. La transformation de format a été réalisée avec le logiciel gratuit de traitement d'image Xnview. Dans un premier temps, nous avons moyenné le niveau de gris sur toute la largeur de l'image à chaque pixel de hauteur.

Grâce au programme que nous avons développé, tous les calculs sont automatisés. Nous pouvons obtenir le profil de niveau de gris à n'importe quel instant. La figure 3.21 montre le profil de niveau de gris moyenné sur 50 images et toute la largeur d'image à chaque pixel de hauteur sur un essai. Ce sont des images en régime permanent d'écoulement couvrant une durée de 0,05 s. D'après la courbe, la partie dense se trouve en bas d'écoulement, ce qui paraît logique.

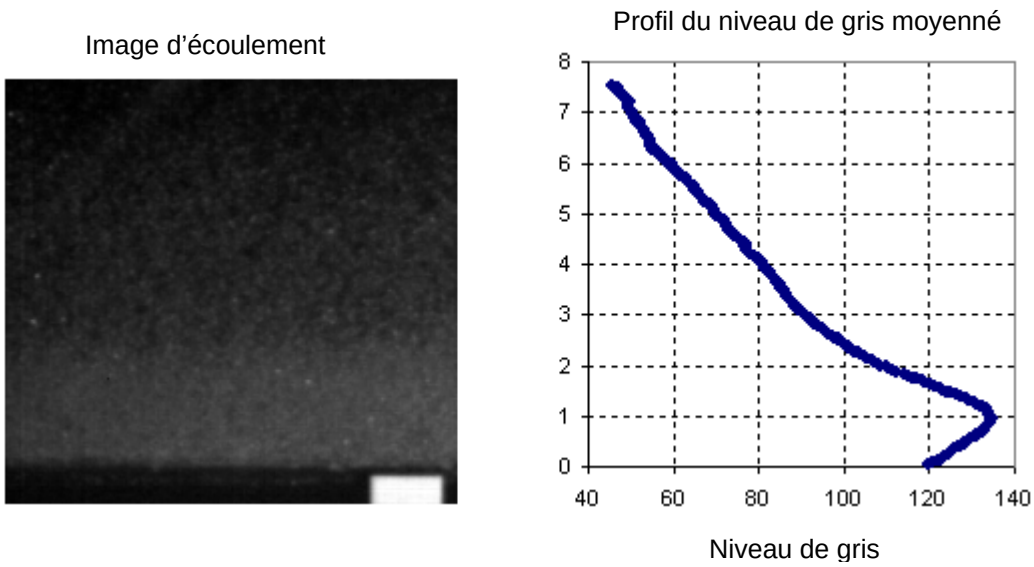


Figure 3.21 Calcul du profil de niveau de gris.

En effectuant le calcul sur une avalanche complète, nous pouvons obtenir un résultat intéressant (voir figure 3.22). Cette image en noir et blanc est un assemblage des profils de niveau de gris à une position donnée, en fonction du temps. C'est donc une image temporelle de l'avalanche à une position donnée, et non une image spatiale de l'avalanche à un temps donné, comme il est possible de voir habituellement. Chaque ligne verticale correspond à une image moyennée, c'est à dire une durée du temps de 0,001s. L'image nous permet de voir clairement des différentes couches verticales et les différents comportements de l'écoulement au cours du temps. Pour cet exemple qui correspond à un essai avec une ouverture de porte initiale de 10 cm, nous observons une forte perturbation au début de l'écoulement et un long régime permanent. Les différentes conditions initiales, en particulier les différentes ouvertures initiales de porte, influencent beaucoup les caractéristiques de l'écoulement. La visualisation des profils de niveau de gris est une bonne méthode pour retrouver rapidement les formes des écoulements sous différentes conditions initiales. Les comparaisons des résultats seront présentées au chapitre suivant. Pour que les visualisations soient plus parlantes, nous avons transformé l'échelle de gris en une échelle de couleur (voir figure 3.23).

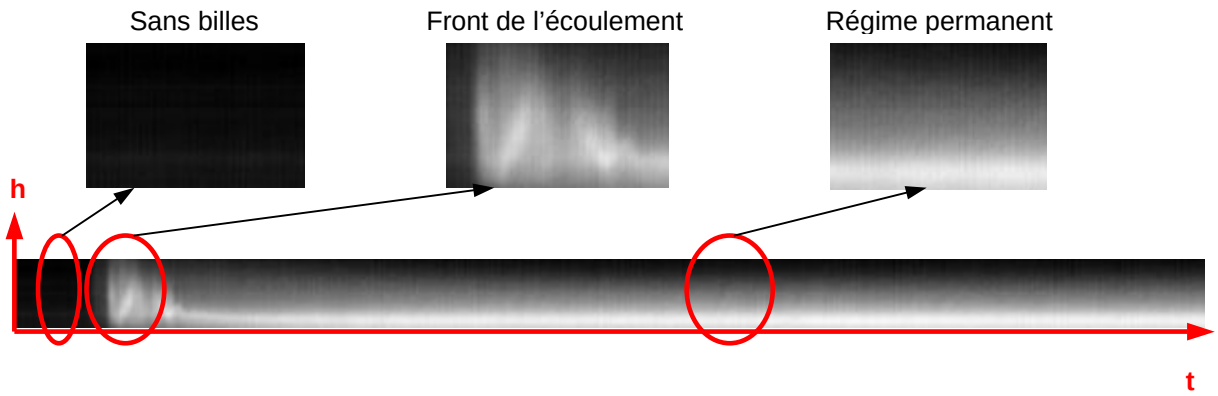


Figure 3.22 Profil de niveaux de gris au cours du temps : Assemblage de l'ensemble des images d'une avalanche à une position donnée.

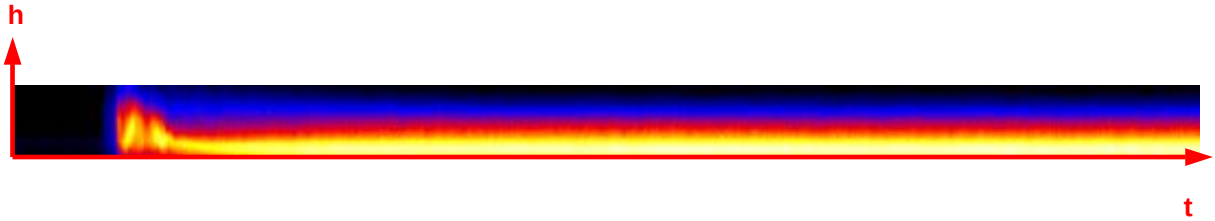
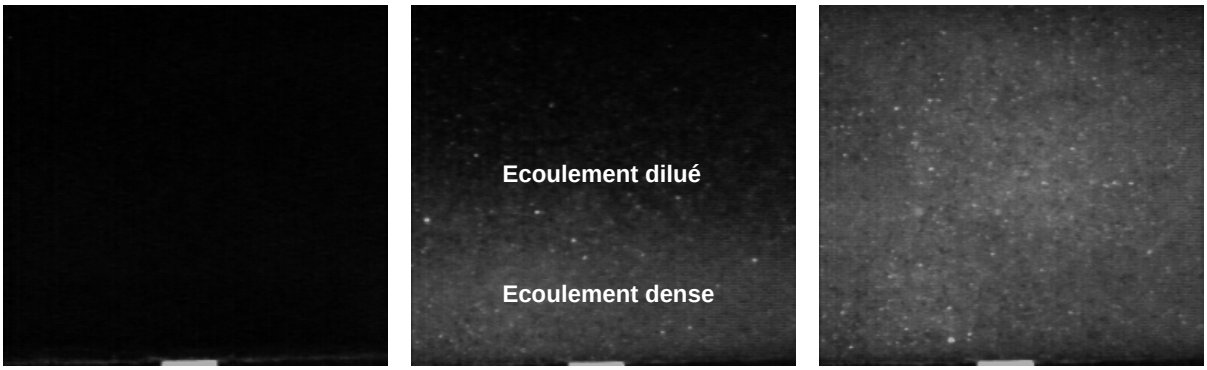


Figure 3.23 Profil de niveaux de gris converti en échelle de couleur.

Retrouver les valeurs physiques

Les valeurs de niveau de gris ne donnent qu'une idée qualitative sur la densité de l'écoulement, elles n'ont aucun sens physique. Nous avons donc essayé de trouver une relation entre le niveau de gris et la porosité ou la masse volumique apparente de l'écoulement. Les billes que nous avons utilisées ont une masse volumique ρ_s de 2350 kg/m^3, une masse volumique apparente de 1637 kg/m^3 et une compacité de 0,7. Le détail de la mesure de ces paramètres est montré en annexe I. Nous avons les deux extrêmes avec des images sans écoulement et des images avec des billes au repos (qui correspondent à une masse volumique apparente maximale 1637 kg/m3). Entre ces deux valeurs extrêmes il nous reste à caler une loi qui n'a aucune raison d'être simple. Les images de ces deux cas extrêmes sous même condition d'éclairage sont montrées dans la figure 3.24 a et c. La valeur moyenne

du niveau de gris de l'image « sans écoulement » est considérée comme un seuil bas et celle de l'image « billes au repos » comme un seuil haut. Si le niveau de gris et la masse volumique sont linéairement dépendant, le problème devient simple. Mais cette hypothèse reste trop simple et n'est pas convaincante en première approximation. Pour valider cette hypothèse, nous avons utilisé une méthode de fluidisation homogène qui nous permet de faire varier la densité apparente d'un mélange de billes. L'objectif étant d'arriver corréler le niveau de gris à des densités de billes connues entre les deux extrêmes cités ci-dessus.



a. Image éclairée sans écoulement
Niveau de gris : Seuil_bas
ρ apparente=0

b. Image éclairée au cours d'écoulement
Niveau de gris= inconnu
ρ apparente=inconnu

c. Image éclairée avec les billes au repos
Niveau de gris : Seuil_haut
ρ_apparente=1637kg/m^3

Figure 3.24 Conditions initiales de l'étalonnage de la masse volumique apparente.

La fluidisation est le phénomène opposé à la sédimentation. Un écoulement de fluide est créé dans le sens opposé à la gravité ce qui permet de maintenir les particules en suspension tandis que dans la sédimentation, ce sont les particules qui tombent dans un fluide au repos. Le principe de la méthode est montré sur le schéma simplifié 3.25. L'ensemble de billes est appelé ici « lit ». Lorsque le lit n'est pas fluidisé, il a une hauteur initiale h_0, correspondant à une porosité minimale ε_0. Lorsqu'il est fluidisé, la hauteur h augmente et la porosité ε augmente aussi. La relation entre la porosité et la hauteur du lit dans un tube de diamètre constant s'écrit :

$$\varepsilon = 1 - \frac{h_0}{h}(1 - \varepsilon_0) \tag{3.1}$$

La formule n'est valable que pour le cas où les particules ont une taille identique. Pour les billes de différentes tailles, une stratification peut se produire pendant la fluidisation. Les petites billes vont monter dans la partie supérieure et les grosses billes vont rester en bas. Cette stratification des billes conduit à une fluidisation non homogène et une porosité irrégulière dans le tube. Ce phénomène a été confirmé avec un test de nos billes dont le diamètre oscille entre 300 μm et 800 μm. Pour éviter ce problème, nous avons utilisé la fraction entre 500 μm et 630 μm de notre matériau. Avec ces billes tamisées, le phénomène de stratification n'a été pas observé. La porosité ε et la densité de billes ρ_s sont égale à 0,4 et 2500 kg/m^3 respectivement dans le cas de billes monodispersées. La fluidisation se faisant dans l'eau, nous faisons l'hypothèse que la loi reste valable pour des billes dans l'air (cas réel).

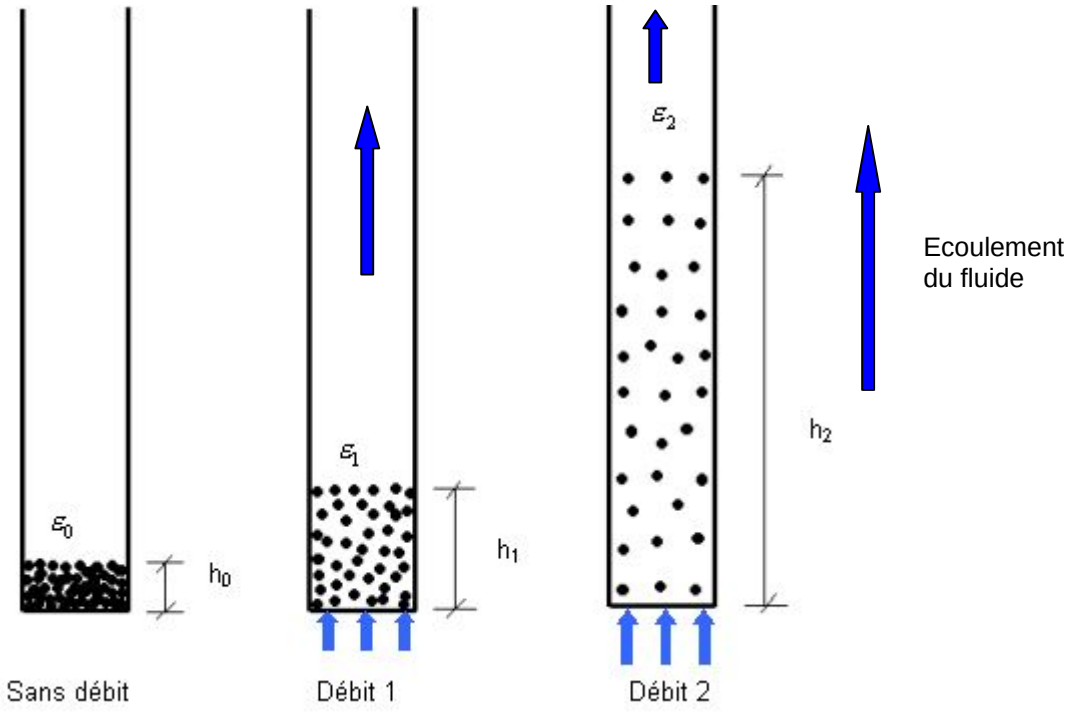


Figure 3.25 Schéma simplifié de la fluidisation.

Nous pouvons donc obtenir différentes porosités en faisant varier le débit à l'entrée de la colonne. A chaque débit, nous calculons la porosité à partir de la hauteur stabilisée du lit et nous enregistrons des images pour calculer les valeurs moyennes de niveau de gris. En reliant ces valeurs, nous trouvons enfin la relation entre la porosité (donc la densité) et la valeur du niveau de gris. Le montage de la méthode de mesure et le résultat sont montrés dans la figure 3.26 et 3.27. Une zone du lit est éclairée par les diodes blanches, pour maintenir les même conditions d'éclairage, les positions des diodes et de la caméra sont fixées. La caméra a été placée en face de la zone intéressante, comme lorsque nous filmons les avalanches de billes.

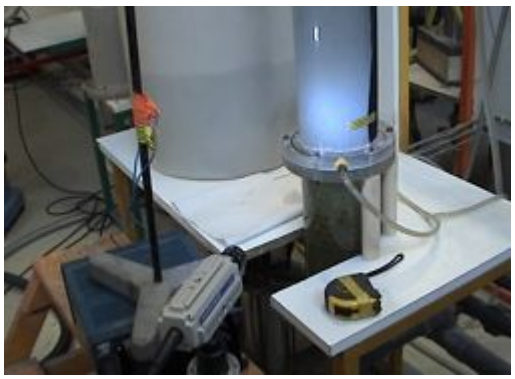


Figure 3.26 Expérimentation en fluidisation et montage de mesure.

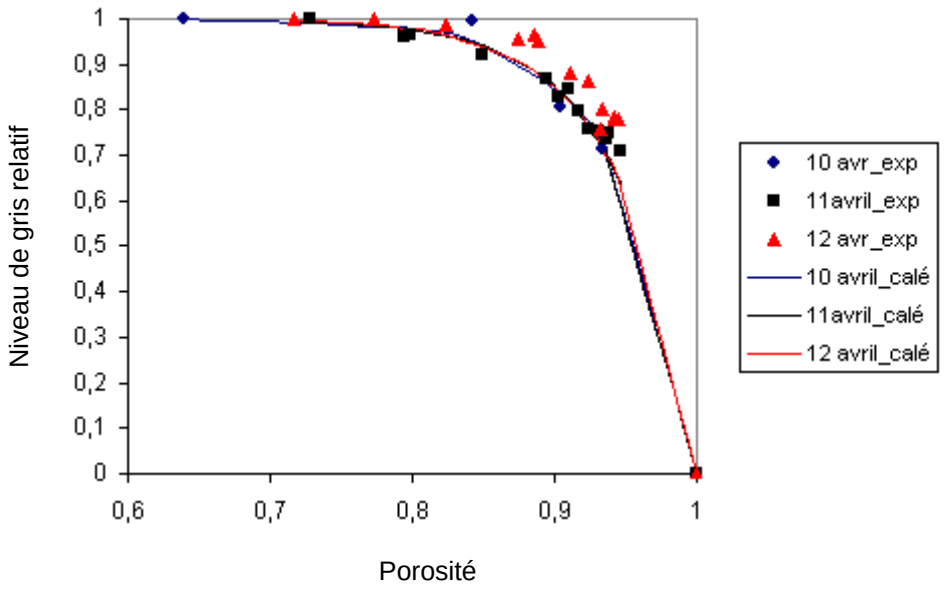


Figure 3.27. Loi d'étalonnage : Rapport entre le niveau de gris relatif et la porosité.

D'après les résultats expérimentaux, la relation entre la porosité et le niveau de gris n'est pas linéaire. Elle peut être simplifiée par la formule suivante :

$$\varepsilon = 1 + \log\left(1 - \frac{Niveau\ gris - seuil_bas}{seuil_haut - seuil_bas}\right)/19 \qquad (3.2)$$

Le paramètre *seuil_bas* correspond à la valeur moyenne du niveau de gris de l'image de l'eau sans billes, le *seuil_haut* correspond à celle de l'image des billes au repos avec de l'eau et le *Niveau gris* représente celle de l'image à une certaine porosité. Il faut remarquer que la condition d'éclairage doit être constante pendant les mesures. En sachant que la source de lumière n'est pas très puissante, les lumières d'environnement ont une influence importante. Il est donc nécessaire d'éviter les moments où il y a des grands changements de lumière naturelle (dans la journée) et de maintenir les même conditions lumineuses (lampes allumées ou éteintes).

Même exigence pour les mesures en canal. Les valeurs de *seuil_bas* (l'image du canal éclairé sans écoulement, appelé l'image noire) et *seuil_haut* (l'image du canal rempli des billes au repos, appelé l'image blanche) sont mesurées juste avant le déclenchement d'écoulement, pendant un laps de temps court.

Influence de l'irrégularité de l'éclairage

D'après le profil du niveau de gris montré dans le paragraphe précédent, nous avons constaté que l'effet dû à la non homogénéité de l'éclairage n'est pas négligeable. Pour vérifier l'influence de ce phénomène, nous avons divisé une image blanche en plusieurs zones et calculé séparément la valeur moyenne du niveau de gris de chaque zone. Tout d'abord, nous avons comparé les valeurs moyennes de chaque zone avec le niveau de gris moyen de toute l'image (le *seuil_haut*) et celui de l'image noire (le *seuil_bas*). Le rapport $\frac{Niveaugris - seuil_bas}{seuil_haut - seuil_bas}$ est appelé ici le niveau de gris relatif. La figure 3.28 a montre un exemple du niveau de gris relatif en fonction de la position sur l'image. Les axes x et y

représentent respectivement la largeur et la hauteur d'image. D'après la figure, le niveau de gris relatif peut varier de 50% dans nos conditions de travail. La valeur maximale du niveau de gris relatif se trouve au milieu de l'image, cela signifie que l'image est beaucoup éclairée au milieu, moins en haut et en bas. Pour régler ce problème de l'irrégularité de lumière, nous avons divisé les images blanches et noires en plusieurs zones, calculé les valeurs de *seuil_bas* et *seuil_haut* de chaque zone donnée et enfin calculé le niveau de gris relatif correspondant. La figure 3.28 b montre le résultat après le réglage. Les valeurs du niveau de gris relatif sont quasi identiques. La précision dépend de la taille des zones divisées.

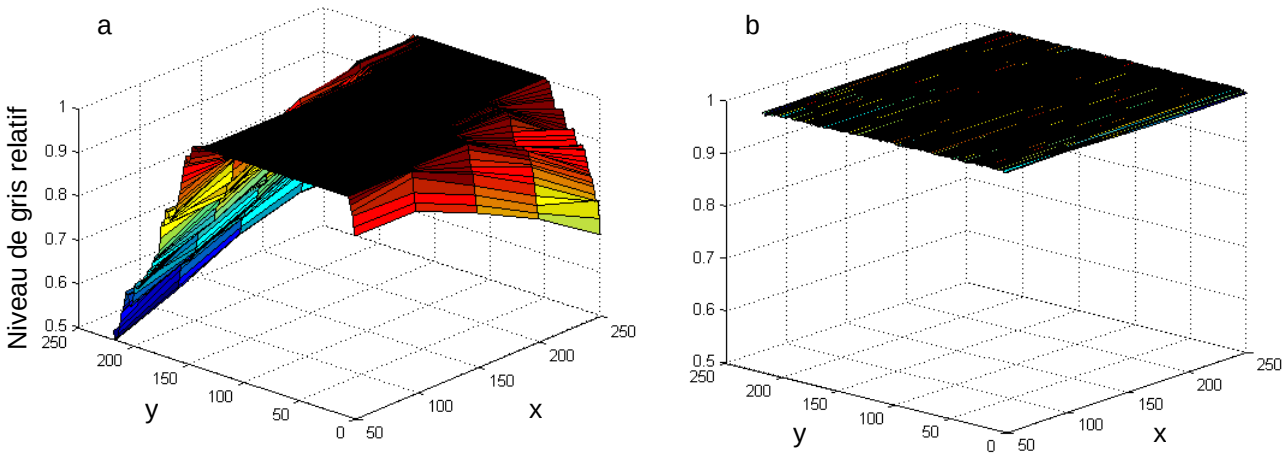


Figure 3.28 Répartition du niveau de gris relatif sur une image blanche éclairée : a. Niveau de gris non corrigé. b. Niveau de gris corrigé.

3.2.2.4 Mesure des forces

Capteur de force piézo-électrique

Pour mesurer les efforts normaux et tangentiels au niveau du canal, nous avons testé plusieurs systèmes. Le premier est un capteur piézo-électrique et le second un capteur à jauges.

Un capteur de force piézo-électrique de modèle 260A01 de la marque PCB a été d'abord utilisé. C'est un capteur à trois composantes qui permet de mesurer les efforts suivant trois directions (voir figure 3.29 a). La capacité de mesure suivant la direction verticale z est de 4,45 kN et celles des deux autres de 2,22 kN. Le capteur doit être précontraint à 22,25 kN suivant la direction z avant d'effectuer les mesures. Nous avons fixé le capteur entre la boite et une plaque de maintien de 10 cm de largeur et 10 cm de hauteur par un boulon de serrage. Celui-ci assure l'immobilisation totale du capteur lors du serrage, mais aussi sa mise sous contrainte. La boite est ensuite fermée par un couvercle et encastrée dans le logement du canal inférieur. A la surface de la plaque et du couvercle de la boîte, nous avons collé une couche de papier de verre. L'espace latéral entre la plaque et le couvercle est de 100 µm. Cette distance assure le fonctionnement du capteur et permet d'éviter la pénétration des billes. La direction de l'écoulement est suivant l'axe y.

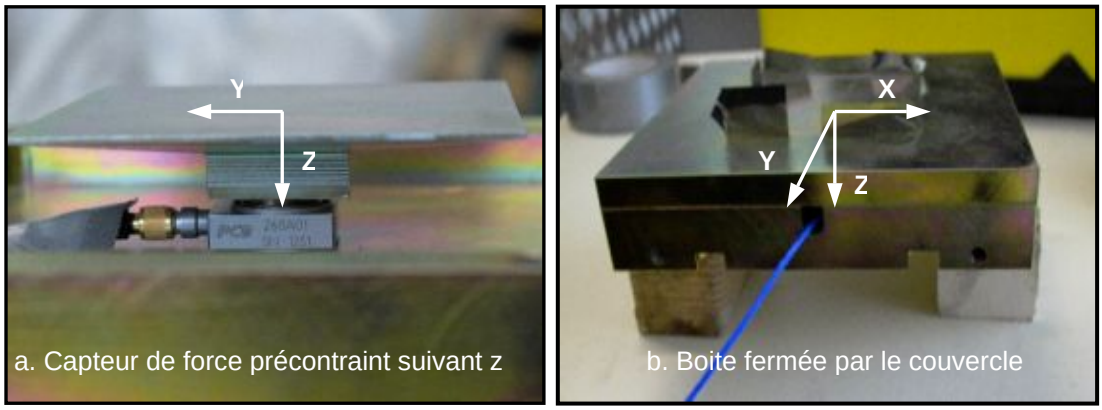


Figure 3.29 Installation du capteur dans la boite.

La calibration du capteur a été effectuée en mesurant le poids propre d'un objet. Nous avons constaté que la précision des résultats dépend de la vitesse du chargement ou déchargement. Plus la vitesse est rapide, plus le résultat est bon. Pour un chargement ou déchargement lent, le signal d'acquisition est faible et le résultat ne correspond plus au poids réel.

Ce problème est fréquent pour ce type de capteur, par contre, nous avions estimé que le temps de déchargement du capteur sous effort constant était de 50 s suivant z et 500 s suivant x et y, ce qui permettait de faire des enregistrements de signaux à basse fréquence. Mais les filtres introduit par la centrale d'acquisition pour accéléromètres ICP n'ont pas permis l'utilisation de ce capteur pour les mesures d'efforts dans l'écoulement granulaire. Nous avons constaté une décroissance rapide des signaux après le premier impact à cause du 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 de mesure.

Nous avons donc abandonné ce capteur de force piézo-électrique et nous l'avons remplacé par un capteur à jauge. Le capteur de force piézo-électrique nous a néanmoins permis d'obtenir les valeurs maximales des efforts et donc de fournir les éléments nécessaires pour dimensionner le 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. D'après les mesures du capteur de force piézo-électrique, les forces maximales que nous avons obtenues sous les conditions les plus défavorables sont : 50 N pour la force normale Fn et 20 N pour la force tangentielle Ft. Pour dimensionner le capteur à jauge, nous avons pris un coefficient de sécurité de 3, c'est à dire que les pressions maximales de dimensionnement sont égales à 150 N pour la direction normale et 60 N pour la direction tangentielle.

Capteur de force à jauges

Le capteur de force à jauge est basé sur un système classique de balance. Il est constitué d'une poutre en I, d'une plaque qui reçoit l'écoulement et d'une base de fixation (voir figure 3.30). Tous ces éléments ont été réalisés par découpe d'une pièce d'aluminium entière. La plaque fait 9,8 cm de largeur et 9,8 cm de longueur. Deux jauges de déformation sont collées à la base de la poutre. Une certaine souplesse de la poutre est nécessaire pour permettre les mesures mais elle doit être également suffisamment rigide pour supporter l'impact de l'écoulement. La définition de section de la poutre est montrée dans le paragraphe suivant.

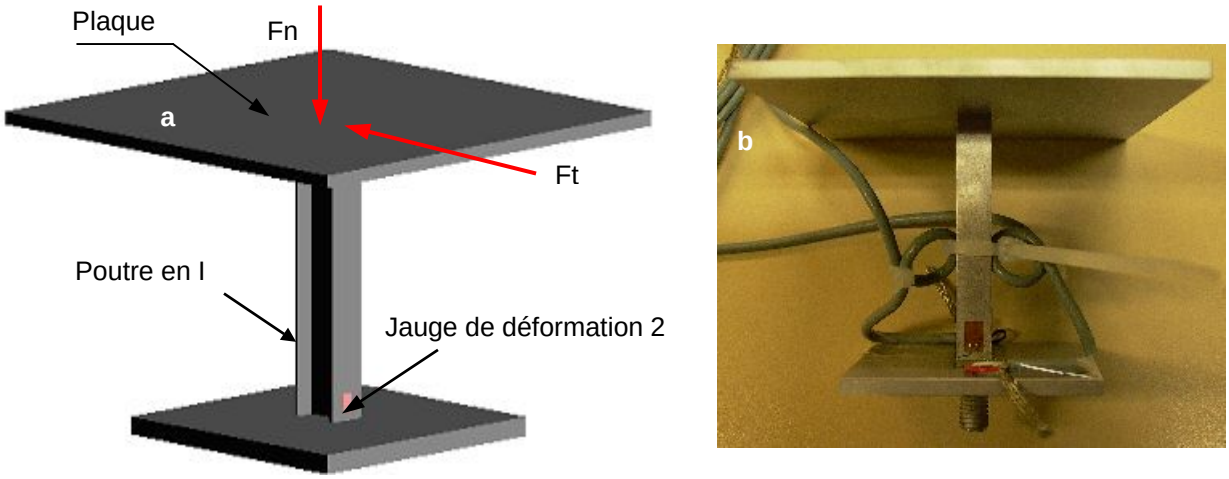


Figure 3.30 a. Schéma simplifié du montage du capteur à jauge b. Photo du capteur à jauge.

Tout d'abord, nous avons défini la position des jauges. La distance entre le centre des jauges et la surface de la plaque L est de 60 mm. Le module d'Young de cet aluminium est égale à 70000 MPa. L'effort horizontal H et vertical V sont respectivement de 60 N et 150 N. Le moment subit par la poutre au niveau des jauges est donc de 3600 N.mm^2. La déformation de compression propre est définie par $\varepsilon = -\frac{V}{EA}$, et celle de la flexion propre est $\varepsilon_{flexion} = \pm \frac{M}{EI}\frac{h}{2}$. En cas de chargements en flexion composés, les déformations de deux jauges sont définies comme suit :

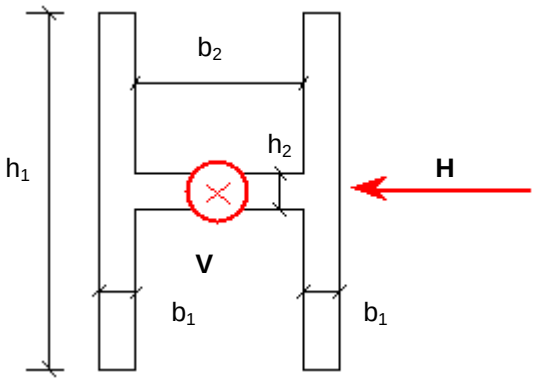


Figure 3.31 Section de la poutre.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{com} + \varepsilon^{-}_{flexion} \tag{3.3}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{com} + \varepsilon^{+}_{flexion} \tag{3.4}$$

Pour avoir une bonne précision, les valeurs de ε_1 et ε_2 ne doivent pas être trop petites. Mais elles sont aussi limitées par la capacité des jauges et la non plastification de la section. En considérant ces trois facteurs, les valeurs de ε_1 et ε_2 sont définies entre 500 µm et 1000 µm. A partir de ces éléments, nous avons défini les dimensions de la section de poutre : h1=9mm, b1=0,7mm, h2=0,7mm, b2=10mm. La surface de la section A est de 19,6mm^2. L'inertie dans la direction H est de 419,49 mm^4.

Calibration : cas de la compression simple

Le premier test de calibration a été effectué en compression simple. Dans le domaine élastique et quel que soit le chargement, les déformations ε_1 et ε_2 doivent être identiques. Les résultats de mesure sont donnés dans la figure 3.32. Les valeurs mesurées par les deux jauges ne sont

pas identiques et présentent une différence non négligeable. L'inégalité des valeurs est due au fait qu'il est très difficile de centrer un chargement sur ce type de structure. Par contre, lorsque nous faisons la moyenne des deux déformations (courbe bleu), nous retrouvons bien les valeurs issues du calcul théorique (courbe rouge). La pente de la courbe moyenne est de –0,7122 µm/N. Par rapport à celle de la courbe théorique, nous avons 2,3% de différence.

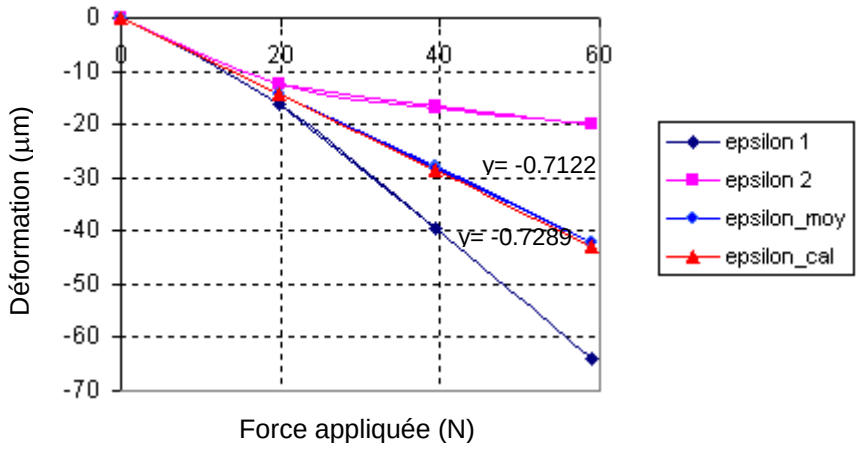


Figure 3.32 Déformations des jauges sous charge et décharge verticales (en cas de compression propre).

Calibration : cas de la flexion propre

Nous avons également effectué la calibration en flexion simple. Les valeurs calculées pour les deux jauges doivent être opposées et leurs valeurs absolues identiques. D'après les valeurs de mesure, cette identité des valeurs absolues n'a pas été retrouvée. Les valeurs de ε_2 sont toujours plus importantes que celles de ε_1 (voir la figure 3.33). Cet effet est dû à une légère différence des positions de deux jauges sur la poutre. La jauge 2 a été collée un peu plus bas que la jauge 1. Nous avons retrouvé et corrigé cette distance de décalage. Les résultats après la correction sont satisfaisants (les deux pentes sont quasi identiques).

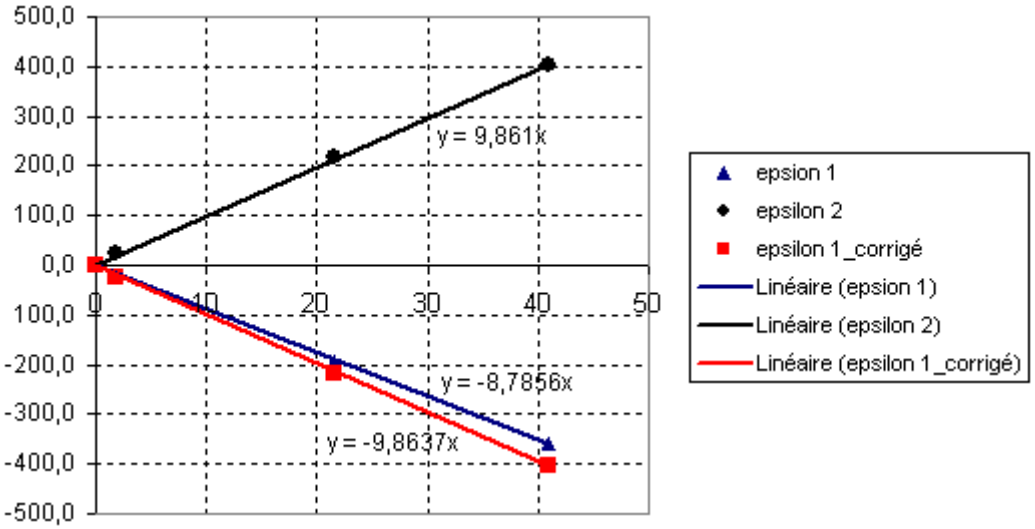


Figure 3.33 Déformations des jauges sous chargement horizontal (cas de flexion simple).

Les déformations de compression et flexion après la correction sont définies par :

$$\varepsilon_{com} = \varepsilon_2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/(1 + 0,89098469) \tag{3.5}$$

$$\varepsilon_{flex} = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)/(1 + 0,89098464) \tag{3.6}$$

Après avoir défini les pentes et les formules corrigées pour calculer les déformations de compression et flexion, les efforts verticaux et tangentiels peuvent enfin être calculés :

$$V = \frac{\varepsilon_{com}}{-0,7122} \quad \text{(N)} \tag{3.7}$$

$$H = \frac{\varepsilon_{flexion}}{9,861} \quad \text{(N)} \tag{3.8}$$

3.3 Expérimentation sur les avalanches de neige réelles au col du Lautaret

3.3.1 Introduction

La mise en place de l'instrumentation a été réalisée en automne 2005 et les premiers résultats ont été exploités durant l'hiver 2005-2006. Nous allons d'abord présenter dans le paragraphe suivant le site expérimental d'avalanches de neige du col du Lautaret. La conception et le dimensionnement de la plaque-capteur seront ensuite présentés plus précisément.

3.3.2 Introduction du site du Lautaret

Le site du col du Lautaret est un site expérimental géré par le Cemagref de Grenoble pour étudier les phénomènes d'avalanches de neige à échelle naturelle. Ce site est situé dans les Hautes-Alpes entre le col du Lautaret et le col du Galibier. Sept couloirs se trouvent sur la face sud-est de la crête de Chaillol et ils sont coupés par la route du Galibier. La route du Galibier est fermée pendant l'hiver et réouverte pour l'été. Les altitudes de départ des avalanches se situent entre 2300 et 2600 mètres et les zones d'arrêt se trouvent vers 2100 mètres. Les pentes sont d'environ 45° dans la zone de départ et de 30° dans la zone d'écoulement. Les volumes des avalanches sont généralement compris entre 500 m^3 et 1500 m^3 pour des parcours allant de 300 à 800 mètres.

La première période d'utilisation du site se situe entre 1972 et 1981. Pendant cette période, de nombreux d'équipements avec notamment deux Catex, deux abris de chantier, le support de capteurs et la mise en souterrain des lignes de transmissions des données sur quatre couloirs ont été réalisés. A partir de 1981, le site a été mis en sommeil à cause de problèmes de financement. Il a été relancé à partir de 1991 et reste en fonctionnement jusqu'à présent. Un accident provoqué par une avalanche de neige dense en 1995 a détruit tout le matériel de mesure et les supports de capteurs. Cela a mené à développer de nouveaux systèmes de support et de déclenchement. Depuis, un support de capteur et un abri en béton armé situé à 15 m en rive gauche protégé par une étrave ont été construits. En 1997, le système de déclenchement Gazex a été installé dans le couloir 2 et testé avec succès. En 2000, le couloir 1 a été équipé du système déclenchement Alvahex. Les instruments expérimentaux ont été ensuite graduellement développés dans ces couloirs. Lors de l'hiver 2002-2003, un tripode de structures fusibles a été mis en place dans le couloir 2 (voir figure 3.34 d) et il a été instrumenté et exploité la saison suivante. Le tripode fait 4 mètres de haut, ce qui permet de fixer des fusibles des deux cotés et à différents niveaux sur des platines adaptées. Les fusibles sont des structures en aluminium 6060T5 constitués d'un bloc d'encastrement et d'un plat fusible (figure 3.34 f). Ils ont été placés perpendiculairement à la direction de l'écoulement de l'avalanche. Les déformations des fusibles dues à un écoulement d'avalanche mesurées en fonction du temps peuvent permettre de déduire la distribution spatiale et temporelle des pressions perpendiculaires à l'écoulement exercées par l'avalanche (par méthode inverse).

Durant la saison de l'hiver 2003-2004, une autre expérimentation a été installée dans le couloir 1. Il s'agit d'une plaque de 1 m^2 supportée par une poutre en acier (figure 3.34 e). La poutre est fixée et instrumentée à sa base avec plusieurs jauges. Le déplacement de la plaque (ou poutre) est limité dans le domaine élastique par un mur vertical arrière. Selon le même principe que les fusibles, les pressions générées par l'avalanche peuvent être déduites à partir

du déplacement de cet ouvrage. Les pressions sont des valeurs moyennées sur la surface de la plaque.
Sur la face Nord-est de la crête de Chaillol, il existe un grand couloir qui fait 500 m de long et 100 m de large. Le système Alvahex a été installé dans ce couloir. Mais ce système n'a jamais réussi à déclencher une avalanche jusqu'à présent. Le premier déclenchement artificiel réussit a eu lieu le 14 mars 2006. Une explosion directe a permis ce déclenchement. Actuellement, aucun instrument expérimental n'a été installé dans ce couloir, mais avec le succès des déclenchements de 2006, puis de 2007, l'installation des équipements expérimentaux sera graduellement possible.

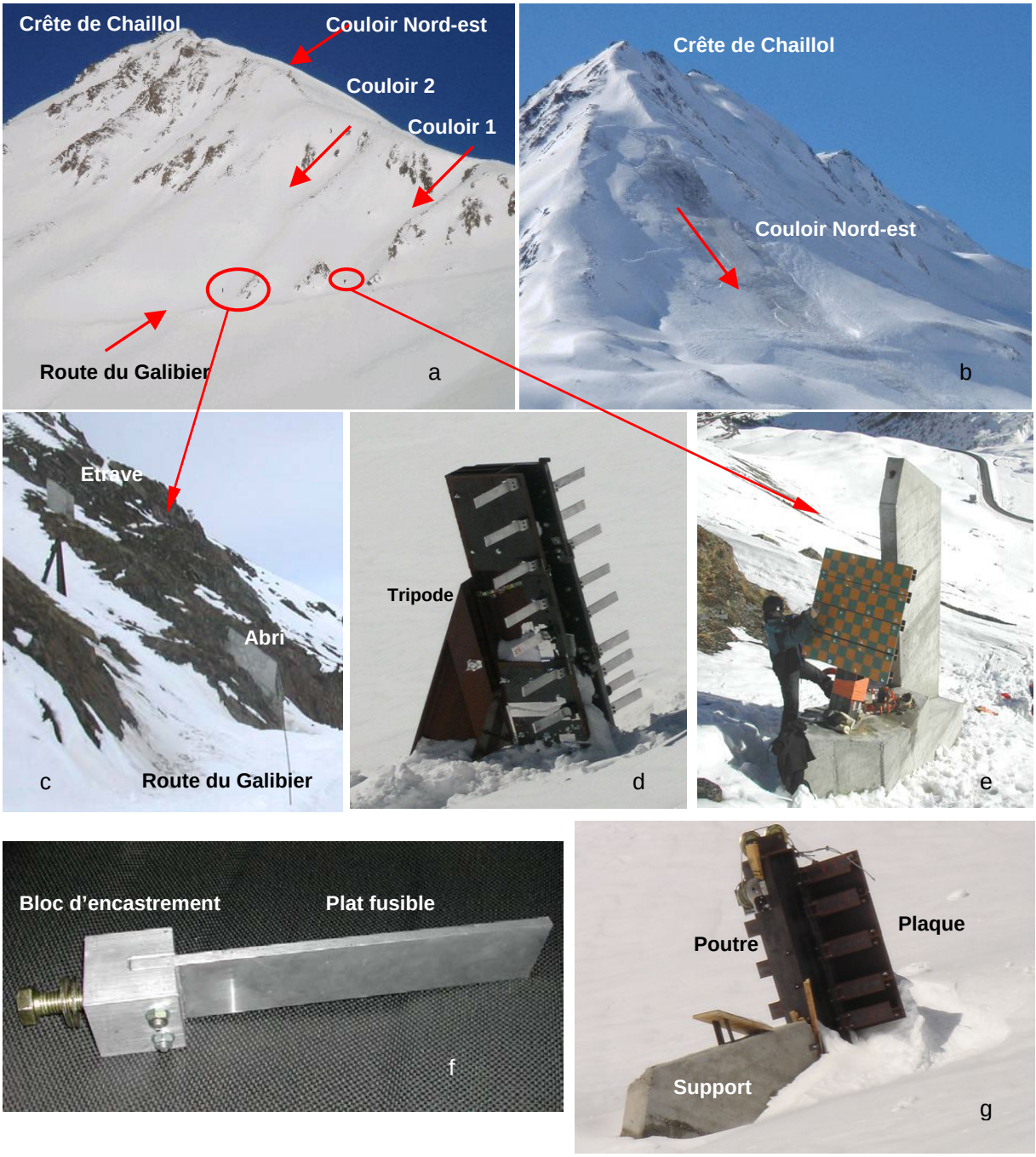


Figure 3.34 Site expérimental du col du Lautaret : (a). Face sud-est de la crête de Chaillol (b). Face Nord-est de la crête de Chaillol (c). Couloir 2 proche de la route du Galibier (d). La structure du tripode dans la neige avant le déclenchement d'avalanche (e). Installation de la plaque dans le couloir

1. (f). Ensemble de la structure fusible. (g). Structure de la plaque dans la neige avant le déclenchement de l'avalanche.

3.3.3 Développement de la plaque-capteur

3.3.3.1 Conception

La conception de la plaque-capteur basée sur un système de balance a été réalisée à partir de travaux préliminaires à ce travail de thèse. Le principe du système a été brièvement présenté dans l'introduction de ce chapitre. Poursuivant le travail précédant et considérant la situation réelle, nous avons développé et finalisé la conception de ce système de mesure. Nous présentons ici en détail l'instrumentation du système et son fonctionnement.

Pour simplifier, l'ensemble de l'instrumentation est appelé plaque-capteur. La plaque-capteur est constituée d'une plaque de couverture d'une certaine rugosité et d'une balance de capteurs. La rigidité de l'ensemble est exigée.

Dans les études précédentes, la plaque de couverture a été initialement envisagée comme étant une plaque en béton armé de plusieurs centimètres d'épaisseur. Dans ce cas, la rigidité est assurée. Mais le massif en béton armé est trop lourd, son poids propre peut mener à une grande difficulté de transport et d'installation sur site. Par conséquent, nous avons abandonné cette solution et proposé une solution en contre-plaqué. Dans un premier temps, nous considérons qu'un contre-plaqué est suffisamment rigide. De plus, nous avons recouvert la plaque d'un matériau qui nous permet de retrouver la rugosité du béton.

La balance est constituée de deux bâtis métalliques, de cinq capteurs de force identiques et de câbles de soutien (voir le schéma 3.35). Les capteurs choisis sont des capteurs électroniques en acier inoxydable. L'installation des capteurs permet de relier les deux bâtis ensemble. L'ensemble des capteurs et des bâtis forme le système de mesure. Pour la stabilité du système, les capteurs sont placés dans des postions symétriques. Trois capteurs sont installés dans la direction verticale et les deux autres sont installés dans la direction horizontale. Les efforts verticaux sont donc la somme des trois capteurs placés verticalement, et les efforts horizontaux sont la somme des deux capteurs placés horizontalement. Pour éviter la translation et la torsion entre les deux bâtis et avoir une meilleure stabilité de l'ensemble du système, les bâtis sont renforcés par des câbles métalliques qui ne présentent aucune rigidité dans les sens des efforts mesurés.

Pour simuler le toit de galerie paravalanche, la plaque-capteur doit être inclinée. L'inclinaison de la plaque est réalisée par les liaisons entre la structure et la fondation. En amont, la plaque est fixée sur la fondation. En aval, la plaque est soutenue par deux barres verticales. Ces deux barres sont encastrées à la fois sur la plaque et sur la fondation. Dans un ouvrage réel, l'angle d'inclinaison du toit de galerie par rapport à l'horizontal est variable et compris entre 10° et 20°.

Pour étudier l'influence de différentes configurations sur les sollicitations, l'inclinaison de la plaque est modifiable. La hauteur des barres est donc ajustable pour permettre la variation de l'inclinaison de la plaque.

Enfin, pour protéger les capteurs, des jupes en plastique sont mises en place autours des bâtis. Les techniques d'installation seront détaillées plus tard.

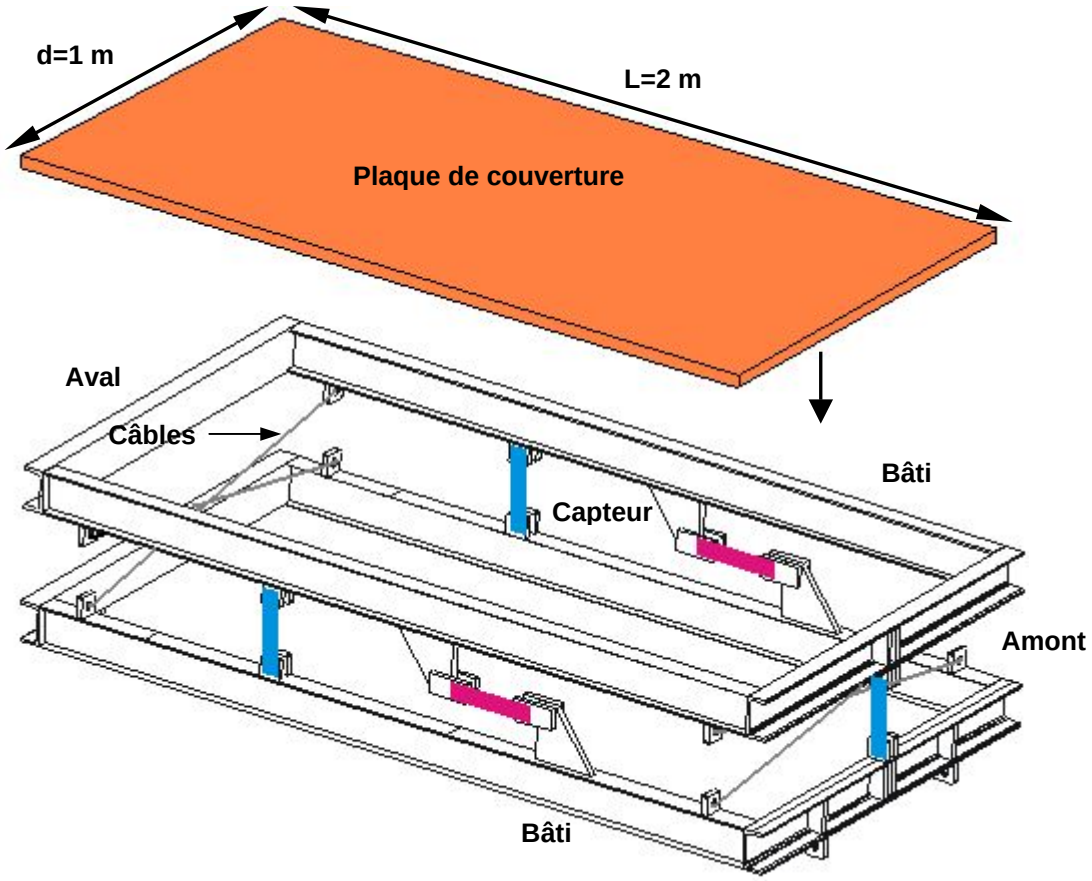


Figure 3.35 Schéma simplifié de la structure du système de mesure de la plaque-capteur.

3.3.3.2 Dimensionnement

La dimension de la plaque-capteur ne doit pas être trop grande, d'une part pour faciliter les manœuvres lors de la mise en place, et d'autre part pour ne pas trop moyenner les efforts sur la surface. Par contre, elle ne doit pas être trop petite, car un ouvrage de petite taille peut être influencé par les phénomènes d'hétérogénéité provoqués par la turbulence de l'écoulement. De plus, une taille suffisante peut permettre d'étudier les effets globaux de l'écoulement sur la structure. La taille de la plaque finalement choisie est un mètre de largeur et deux mètres de longueur. Pour dimensionner la capacité des capteurs, il est nécessaire de connaître les chargements maximaux que l'instrumentation va subir. Il faut donc d'abord définir la position d'installation du système et déterminer ensuite les caractéristiques des avalanches de référence correspondantes. Pour prendre en compte le cas le plus défavorable pour le système, les plus grandes valeurs de vitesse, de volume, d'épaisseur et de densité d'avalanches de référence sont recherchées.

Position d'installation du système

Les couloirs 1 et 2 sont équipés de systèmes de déclenchement fiables (gazex) et de supports équipés. Parmi ces deux couloirs, le couloir 1 est relativement large et il a une zone de départ en courbe. Cela conduit parfois à une légère déviation de l'écoulement par rapport à l'axe du couloir. En cas de déviation, l'écoulement principal peut contourner l'instrumentation de

petite taille, les mesures devenant moins intéressantes. L'existence de la déviation de l'écoulement mène donc à une difficulté de détermination de la position de l'instrumentation.
Par conséquent, nous avons choisi le couloir 2 qui est relativement étroit et moins courbé. Le positionnement exact est défini dans l'axe du couloir 2 juste en dessous de la route du Galibier. La présence de la route du Galibier permet de faciliter la mise en place de l'instrumentation. Par contre, elle produit une rupture de pente remarquable avant la structure de mesure en cas de déneigement. C'est le cas favorable pour la sécurité de la structure, mais ce n'est pas notre sujet d'étude. Pour étudier l'effet d'impact, la structure doit se situer à une certaine distance du changement de pente. En dehors de cette distance, l'effet d'impact disparaît. Il est donc nécessaire de vérifier si la position de la plaque de mesure est dans le domaine d'impact. [K. Platzer 2006] a proposé un paramètre adimensionel X* pour décrire la distance de l'effet d'impact. X*= x/h, avec x est la distance après la rupture de pente, h est l'épaisseur de l'écoulement. Pour X*>5, l'effet d'impact est considéré nul. Dans l'axe du couloir 2, la route a une largeur d'environ 10 mètres et l'épaisseur de l'écoulement de la partie dense a un ordre de grandeur de 1 mètre. La valeur X* est donc généralement supérieure à 5. Mais dans la réalité, pendant la période d'expérimentation, la route est toujours recouverte par une certaine épaisseur de neige. En cas d'enneigement, la route devient invisible et elle est reliée à la pente amont. La rupture de pente se rapproche de la plaque qui est située par conséquent dans la zone d'impact. Sa position en dessous de la route du Galibier est donc jugée raisonnable.

Caractéristique des avalanches de référence

D'après les enregistrements des années précédentes et les avis des experts avalancheux du CEMAGREF de Grenoble, les valeurs caractéristiques critiques des avalanches courantes au niveau de la route du Galibier sont estimées comme les suivantes :
- La masse volumique est de ρ = 350 kg/m^3,
- La vitesse V est de 25 m/s,
- L'épaisseur de l'écoulement de la partie dense est de h = 1 m.

Calcul de pressions

Les pressions subies par la plaque sont de deux catégories : la pression statique P_s et la pression dynamique P_d. La pression statique résulte du poids propre du dépôt de neige sur la plaque avant et après l'avalanche.

$$p_s = \rho g h$$

Ses composantes dans la direction normale et tangentielle sont :

$$p_{sn} = \rho g h \cos\alpha \text{ et } p_{st} = \rho g h \sin\alpha$$

avec α angle d'inclinaison de la plaque compris entre 10° et 20°. En prenant la masse volumique maximale de la neige au repos enregistrée dans le couloir 2 (ρ = 466 kg/m^3) et en supposant 1 mètre d'épaisseur de neige posée sur la plaque, les pressions statiques maximales estimées sont les suivantes : $p_{sn} = 4{,}5$ kPa, $p_{st} = 1{,}6$ kPa.
La pression dynamique sur la plaque est calculée à partir des formules classiques. Pour la pression normale, nous avons :

$$p_{dn} = \rho V^2 \frac{h}{L} \sin \beta$$

avec ρ, V, h les caractéristiques d'avalanches de référence. La longueur et l'angle de déviation L et β sont les paramètres variables selon les différents recouvrements du manteau neigeux et les différentes inclinaisons de plaque. La figure 3.36 montre la topographie autour de la route du Galibier dans l'axe du couloir n°2. La route a une largeur d'environ 11,3 m. En amont de la route, sur une distance d'environ 20 mètres, la pente atteint 45°. Au-delà de cette partie, la pente moyenne diminue à 35°. En aval de la route, la pente moyenne est d'environ 35°. La pression tangentielle est déterminée à partir de la pression normale en multipliant par le coefficient de frottement *c* compris entre 0,2 et 0,4. Nous prenons *c* = 0,4 pour considérer le cas le plus défavorable. Le tableau suivant liste les pressions calculées dans différentes conditions proposées (en kPa). « L » correspond à la distance de déviation.

Pression normale en kPa			
L (m)	β=25°	β=20°	β=15°
2	46,20	37,39	28,29
3	30,80	24,93	18,86
4	23,10	18,70	14,15
5	18,48	14,96	11,32
6	15,40	12,46	9,43
7	13,20	10,68	8,08
8	11,55	9,35	7,07
9	10,27	8,31	6,29
10	9,24	7,48	5,66

Pression tangentielle en kPa			
L (m)	β=25°	β=20°	β=15°
2	18,48	14,96	11,32
3	12,32	9,97	7,55
4	9,24	7,48	5,66
5	7,39	5,98	4,53
6	6,16	4,99	3,77
7	5,28	4,27	3,23
8	4,62	3,74	2,83
9	4,11	3,32	2,52
10	3,70	2,99	2,26

Tableau 3.2 Estimation des pressions dynamiques sur la plaque.

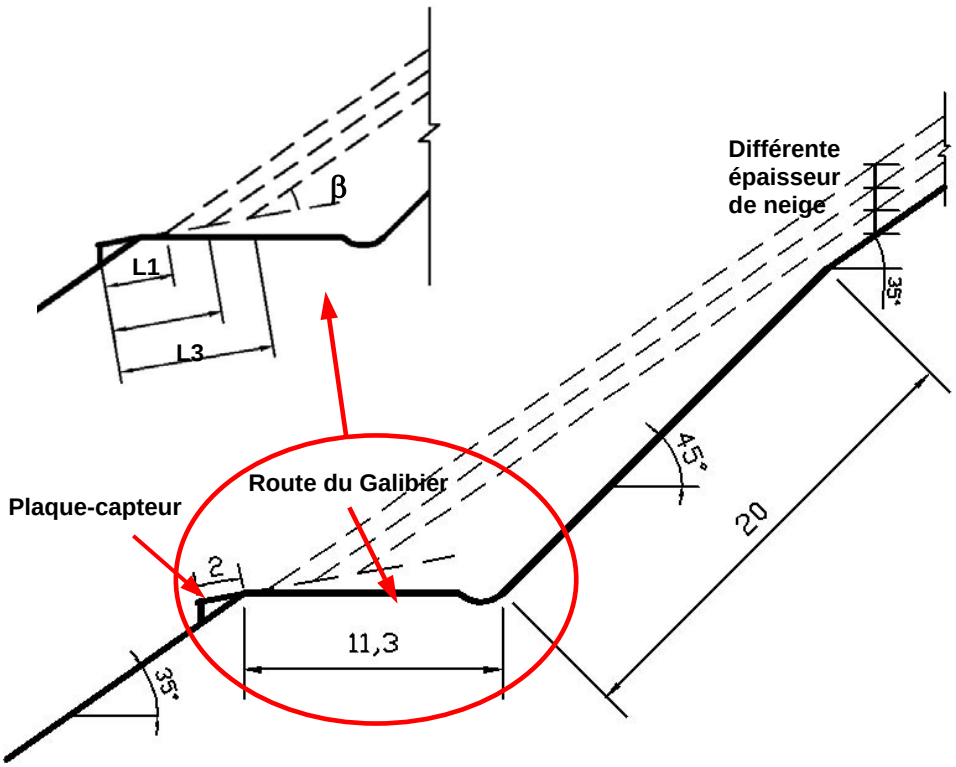


Figure 3.36 Schéma simplifié de la topographie autour de la route du Galibier dans l'axe du couloir n°2.

Une longueur de déviation de 2 mètres signifie que la route est entièrement invisible, c'est un cas rarement rencontré, car une avalanche est déclenchée dès que le couloir est suffisamment chargé, c'est à dire avant d'atteindre cette épaisseur de neige sur la route. D'après les experts du CEMAGREF, dans le cas où la moitié de la route serait invisible, une avalanche peut être déclenchée. Cela se traduit une longueur de déviation totale comprise entre 6 et 8 mètres. Selon le tableau 3.2, les pressions maximales correspondantes sont d'environ 15 kPa pour la pression normale et 6 kPa pour la pression tangentielle. Les efforts résultants sur la plaque sont de 30 kN pour l'effort normal et de 12 kN pour l'effort tangentiel.

Choix du capteur et de l'épaisseur de la plaque de couverture

Comme nous l'avons présenté dans le paragraphe 3.3.3.1, la balance est constituée de trois capteurs installés verticalement et de deux horizontalement. Dans le cas où la plaque est inclinée, les mesures des capteurs verticaux et horizontaux représentent les efforts normaux et tangentiels. Pour une résultante des efforts normaux de 30 kN, chaque capteur prend une charge de 10 kN. En prenant un coefficient de sécurité de 2, nous avons défini la capacité maximale d'un capteur comme étant de 20 kN. Les capteurs de type TS20KN ont été choisis. Les caractéristiques des capteurs sont présentées en annexe II. Ces capteurs ont une capacité de 20 kN et ils sont alimentés par une tension de 10V. Leur sensibilité est de 2 mV/V. Le gain amplificateur est d'environ 500. Les mêmes capteurs sont choisis pour la direction tangentielle, le coefficient de sécurité étant ici de plus de 3.

Pour la plaque de couverture, nous avons choisi un contre-plaqué de 15 mm qui est vissé sur tout son pourtour. De plus, nous avons rajouté un appui en partie centrale afin d'en limiter la flèche.

3.3.3.3 Installation de la plaque-capteur

La figure 3.37 montre la procédure d'installation de la plaque-capteur sur le site. La plaque a été assemblée sur place. La fixation de la plaque sur la pente a été réalisée à l'aide d'une fondation métallique ancrée dans le terrain. Les pattes de fixation métalliques sont soudées sur la fondation métallique, deux en amont, deux en aval (voir figure 3.37 f). Les deux pattes métalliques en amont sont reliées directement à la plaque par deux vis écrous. Même principe de fixation en aval, mais la liaison entre la plaque et la fondation n'est pas directe mais par l'intermédiaire de pieds ajustables. La liaison en amont peut être simplifiée comme une liaison pivot et celle en aval comme un appui simple. Pour que les fils des capteurs arrivent à la centrale d'acquisition qui se trouve à environs 15 m en amont de la plaque, des tubes de protections sont utilisés. Sachant que pendant la période expérimentale, la route du Galibier est fermée, les perturbations extérieures peuvent être négligeables. Les tubes sont donc juste placés au-dessus de la route. La plaque est inclinée 10° par rapport à l'horizontale.

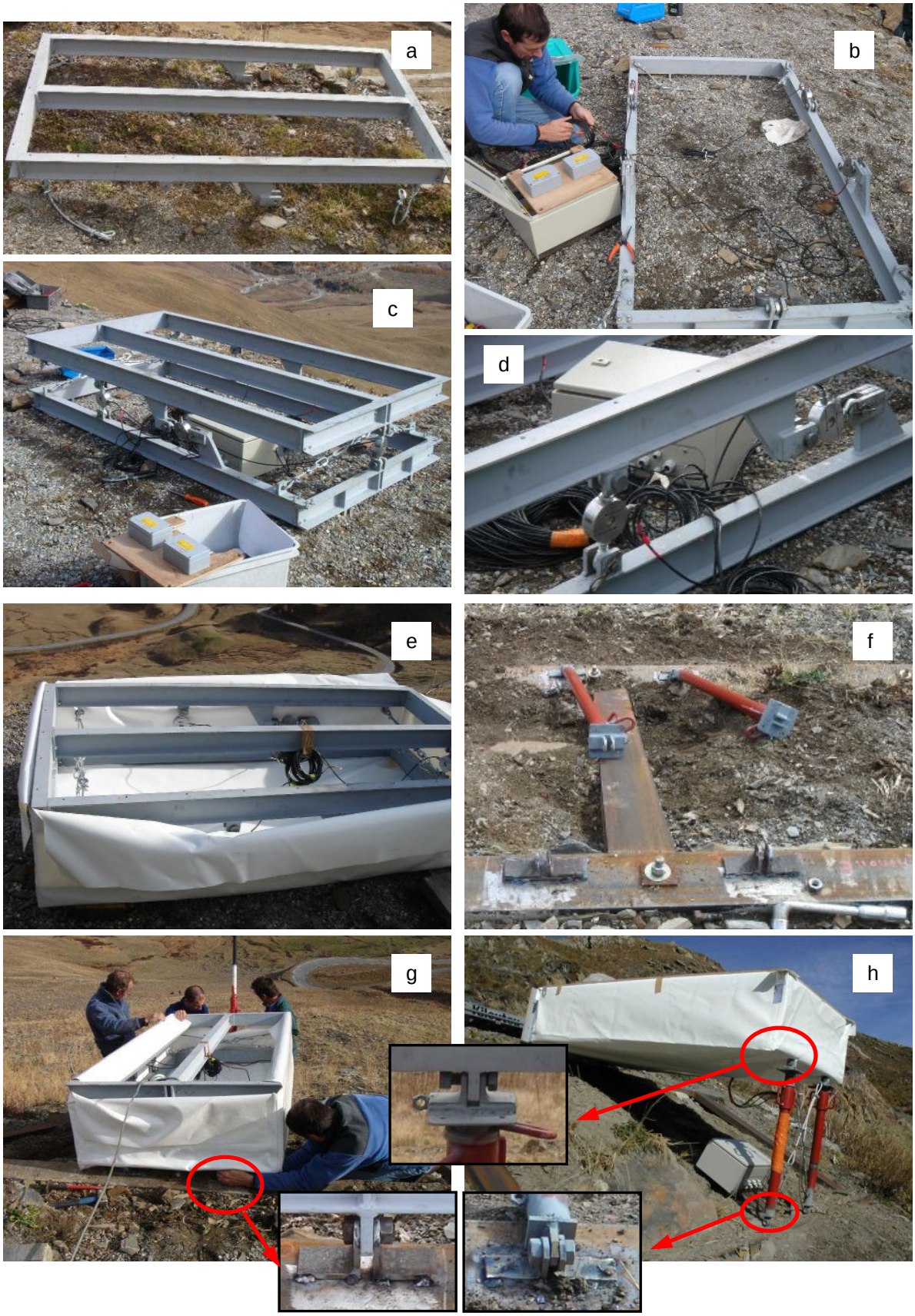


Figure 3.37 Installation de la plaque-capteur sur place : a). Bâti supérieur b). Bâti inférieur avec cinq capteurs de force c). Ensemble de la balance d). Capteurs de force installés dans la direction verticale et horizontale. e). Jupe de protection f). Pattes de fixation g). Fixation de la plaque h). Finalisation.

3.3.3.4 Acquisition

L'enregistrement des signaux des capteurs est exécuté dans l'abri. Avant déclenchement, la plaque est déneigée. La différence des signaux avant et après le déneigement permet de déduire le poids propre du dépôt de neige sur la plaque. à la centrale d'acquisition qui se trouve à environs 15 m en amont 3.3.4 Mesures des caractéristiques d'avalanche

Avant chaque déclenchement d'avalanche, les informations du dépôt de neige dont la température, les caractéristiques et l'épaisseur initiale dans la zone de départ sont enregistrées. Ces enregistrements sont également exécutés dans la zone d'arrêt après l'écoulement. De plus, l'altitude et la forme initiale de l'écoulement au repos sont mesurés pour déduire la distance de parcours et le volume total.

Les caractéristiques de l'avalanche sont mesurées au niveau des instrumentations équipant le couloir 2, c'est à dire au niveau du tripode et de la plaque capteur. Des caméras sont utilisées pour déterminer la vitesse et l'épaisseur de l'écoulement. Elles sont souvent placées au niveau de l'étrave et de l'abri. Pour avoir une vue globale de l'avalanche, d'autres caméras sont installées en bas de la route du Galibier. Les films obtenus nous permettent de distinguer le type d'avalanche et de déduire la vitesse du front d'écoulement à un instant et une position donnée. La mesure de masse volumique est limitée en statique dans le dépôt neige après avalanche. Un tube de volume connu est utilisé pour extraire la neige. La neige dans le tube est ensuite pesée. La masse volumique au cours de l'écoulement est encore un sujet d'étude.

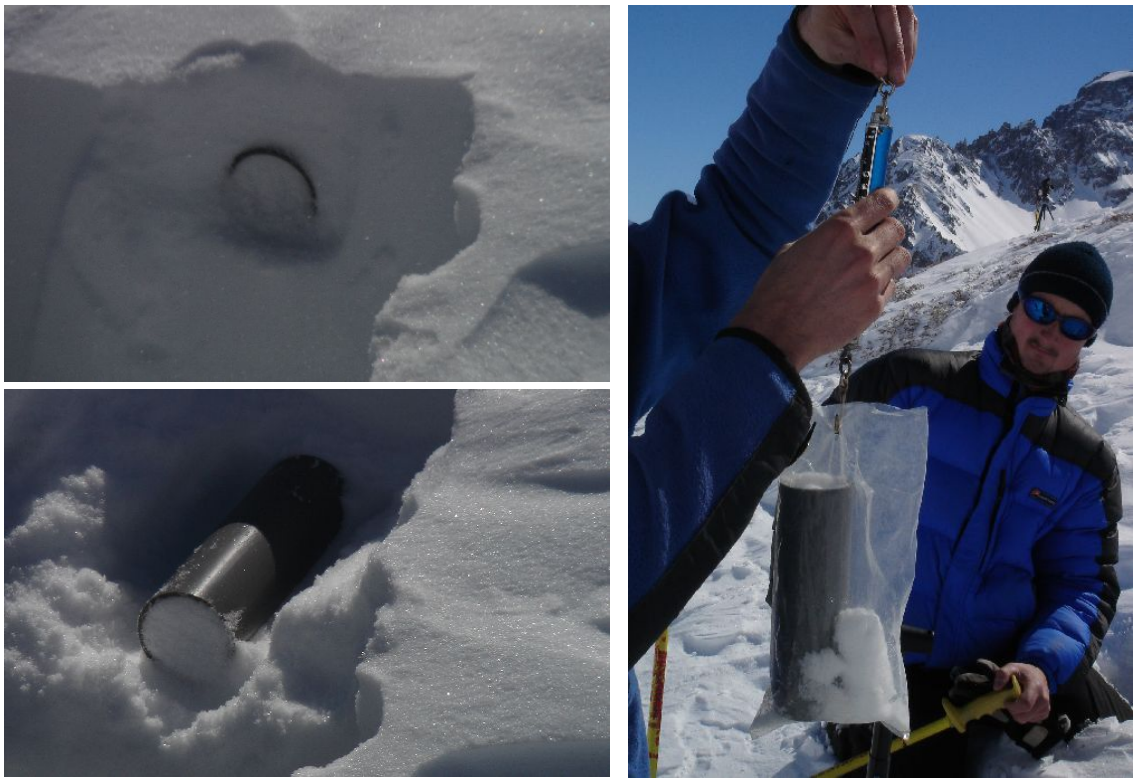


Figure 3.38 Méthode de mesure la masse volumique en statique : Extraction de la neige avec un tube. La masse de la neige de l'échantillon divisée par le volume du tube est la masse volumique (CEMAGREF).

3.4 Conclusion générale

Dans ce chapitre 3, nous avons présenté la réalisation et les mises au point de nos deux expérimentations. Nous avons commencé par l'expérimentation en laboratoire sur les écoulements de matériau granulaires (ici des billes de verre) dans un canal incliné. Le canal a été dimensionné en respectant le nombre de Froude de l'avalanche de neige (loi de similitude) pour que le comportement de l'écoulement granulaire sur le canal incliné soit représentatif de l'avalanche de neige. La configuration de l'expérimentation (l'angle d'inclinaison du canal, l'ouverture initiale de la porte, la position du capteur de force) est ajustable, ce qui permet de faire varier et de contrôler les conditions initiales. Un capteur de force à jauges a été utilisé pour mesurer les efforts d'impact. Pour mieux maîtriser le phénomène d'impact entre l'écoulement et la structure, nous avons envisagé de mesurer les caractéristiques que sont l'épaisseur, la vitesse et la densité de l'écoulement. Des méthodes de mesure pour chaque grandeur physique ont donc été développées.

Pour l'expérimentation au col du Lautaret sur les avalanches de neige réelles, nous avons présenté en détail la conception et l'installation de la plaque-capteur. Les méthodes de mesure de la vitesse du front, de l'épaisseur et de la densité au repos de l'avalanche de neige ont été présentées. Par contre, ces méthodes de mesure sont trop simples pour obtenir les valeurs précises et performantes. Le développement des méthodes de mesure des caractéristiques de l'avalanche de neige est toujours un objet d'étude.

Chapitre 4. Analyse des résultats expérimentaux

Introduction générale

Les résultants présentés dans ce chapitre correspondent aux deux types d'expérimentations que nous avons menées. Dans un premier temps, nous regarderons et analyserons les essais sur avalanches réelles effectuées au col du Lautaret, ensuite nous traiterons les données acquises lors des expérimentations en canal avec le matériau granulaire.

4.1 Résultats de l'expérimentation au col du Lautaret

4.1.1 Liste des tests issus des déclenchements et caractéristiques des avalanches de neige mesurées

Les exploitations des résultats sont faites pour les deux saisons hivernales 2005-2006 et 2006-2007. Au total, cinq avalanches ont pu être déclenchées dans le couloir 2. Nous listons dans le tableau 4.1 les caractéristiques de ces cinq avalanches mesurées en différentes positions dans le couloir.

Localisation	Date	21-févr-06	07-mars-06	14-mars-06	15-févr-07	27-févr-07
Zone de départ	Température atmosphère (°C)	-	-4,2	-	-1	-1,5
	Altitude (m)	2380	2380	2380	2380	2380
	Type	Plaque et reprise de neige dans le couloir	Plaque	Plaque et reprise de neige dans le couloir	Plaque et reprise de neige dans le couloir	Plaque et reprise de neige dans le couloir
	Epaisseur (m)	0,15	0,2	0,2	0,5	0 à 0,7
	Densité (kg/m^3)	100	160	160	80-160	120
	Température neige (°C)	-2,2	-7,4	-4	-2	-2
Tripode	Vitesse d'avalanche (m/s)	13,6	25	-	25	28-30
	Epaisseur de la couche de saltation (m)	1,57	3,5	-	3,5	3,5
Plaque galerie	Vitesse d'avalanche (m/s)	13,6	25	19,3	25	28-30
	Volume du dépôt sur la plaque (m^3)	0,4	0,37	0,31	-	0,6
	Densité dépôt (kg/m^3)	250	300	340	320	220-260
Zone D'arrêt	Altitude basse de zone d'arrêt (m)	2271	2100	2135	2100	2100
	Longueur parcourue (m)	355	500	430	510	510
	Densité (kg/m^3)	260	340	340	320-340	320
	Epaisseur moyenne (m)	0,15	-	0,15	0,3	0,3
	Température neige (°C)	-2,1	-4	-4	-0,8	-0,8 à -1,2

Tableau 4.1 Caractéristiques des avalanches dans le couloir 2 pendant les deux saisons hivernales.

Date	21-févr-06	07-mars-06	14-mars-06	15-févr-07	27-févr-07
Type	Avalanche coulante	Avalanche mixte	Avalanche mixte	Avalanche mixte	Avalanche mixte

Tableau 4.2 Type des cinq avalanches de neiges.

4.1.2 Pressions normales et tangentielles exercées par l'avalanche sur le capteur

Durant la saison hivernale 2005-2006, un premier capteur a été mis en place et son fonctionnement pour la 1ère année de mesure nous a confortés sur les méthodes de mesures. Par contre, l'exploitation des vidéos filmées près de la plaque a permis de constater une déviation de l'écoulement par rapport à l'axe de la plaque. Cela signifie qu'une partie de l'avalanche peut ne pas passer sur le capteur, d'où l'idée d'installer une deuxième plaque pour la saison hivernale 2006-2007. La deuxième plaque a été placée parallèlement à la première (voir la figure 4.1).

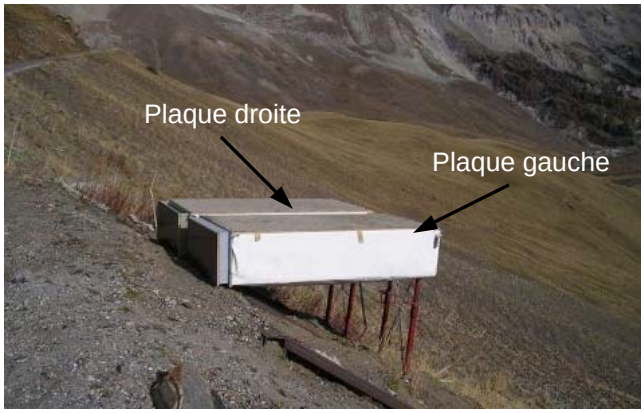


Figure 4.1 Capteurs en parallèle à partir de la saison hivernale 2006-2007.

4.1.2.1 Saison hivernale 2005-2006

Nous présentons d'abord les résultats de la saison hivernale 2005-2006. Dans cette saison d'expérimentation, nous avons trois avalanches déclenchées les 21 février, 7 mars et 14 mars 2006. Les résultats présentés par la suite sont les pressions normales (pn) et tangentielles (pt) des avalanches moyennées sur le capteur de mesure et les ratios pt/pn correspondants.

L'avalanche du 21 février 2006 est une petite avalanche coulante de faible vitesse. La durée de l'avalanche est approximativement de 5 secondes. Selon la courbe de la figure 4.2 a, l'effet de choc qui correspond au début du pic n'est pas très important. Les pressions sur la plaque sont faibles, la valeur maximale de la pression normale est inférieure à 1 kPa et celle de la pression tangentielle est d'environ 0,4 kPa. Ces valeurs faibles peuvent s'expliquer par les efforts peu dynamiques de cette avalanche dont la vitesse a été estimée à 13,6 m/s. Pour ce qui est du ratio moyen entre l'effort tangentiel et l'effort normal, il est de l'ordre de 0,6, ce qui est plus important que les valeurs trouvées dans la partie bibliographique. Néanmoins, la partie après 8 secondes correspond à un chargement statique dont le ratio entre Pn et Pt est de 0,2, ce qui correspond approximativement à tan(10°) (inclinaison de la plaque). Pour tout l'enregistrement avant 8 s, nous sommes sur des signaux relativement faibles.

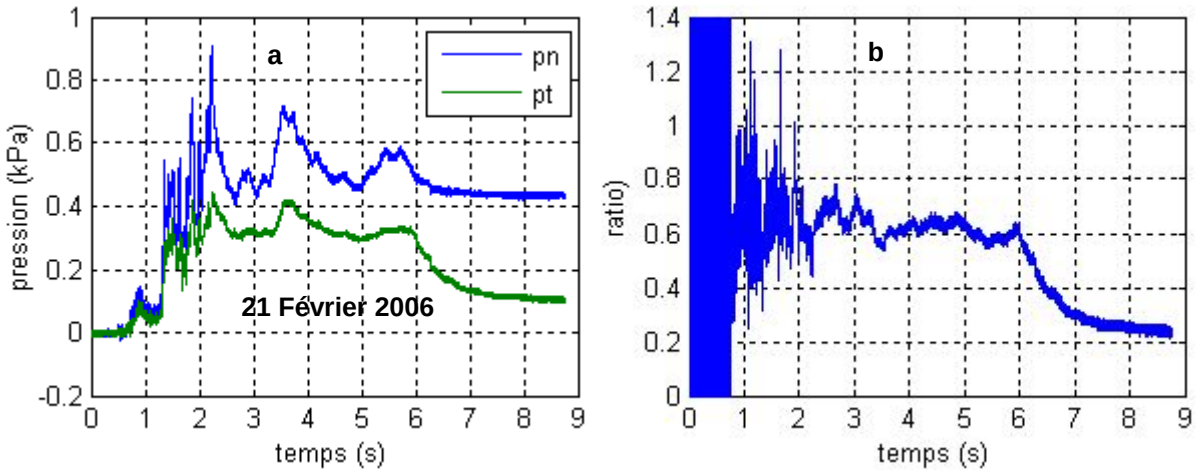


Figure 4.2 Pressions normales et tangentielles de l'avalanche déclenchée le 21 février 2006.

Les avalanches du 7 mars et du 14 mars 2006 sont des avalanches mixtes accompagnées de gros nuages poudreux. Les vitesses d'écoulement sont relativement rapides et l'effet d'impact est très important. Les pressions croissent et décroissent rapidement au cours de l'impact. Les durées du pic de pression sont très courtes, de l'ordre 4 s lors de l'avalanche du 7 mars et 1 s lors de celle du 14 mars. Par conséquent, le ratio pt/pn est très variable en cours d'écoulement. Pour l'avalanche du 7 mars (voir la figure 4.3), avant d'atteindre la pression maximale, le ratio moyen est d'environ 0,3. Cette valeur correspond bien au coefficient de friction donné dans la littérature. Par contre, après la pression maximale (à partir de 6 secondes), le ratio augmente et dépasse 1. Après le passage de l'avalanche, en état statique, le ratio descend un peu mais il reste toujours supérieur à 1. Pour l'avalanche du 14 mars, dans la partie après le pic, nous avons remarqué la même chose (voir figure 4.4). Le ratio supérieur à 1 signifie que la pression tangentielle est plus importante que la pression normale. Ceci n'est théoriquement pas possible ni dans l'état dynamique ni dans l'état statique. Sachant que la précision de capteurs est de 0,023% (4,6 N), les précisions sur les pressions normales et tangentielles sont de 6,9 Pa et 4,6 Pa. La précision de capteur est donc très bonne, le problème ne vient pas de celui-ci. Le problème vient plutôt du montage de l'expérimentation.

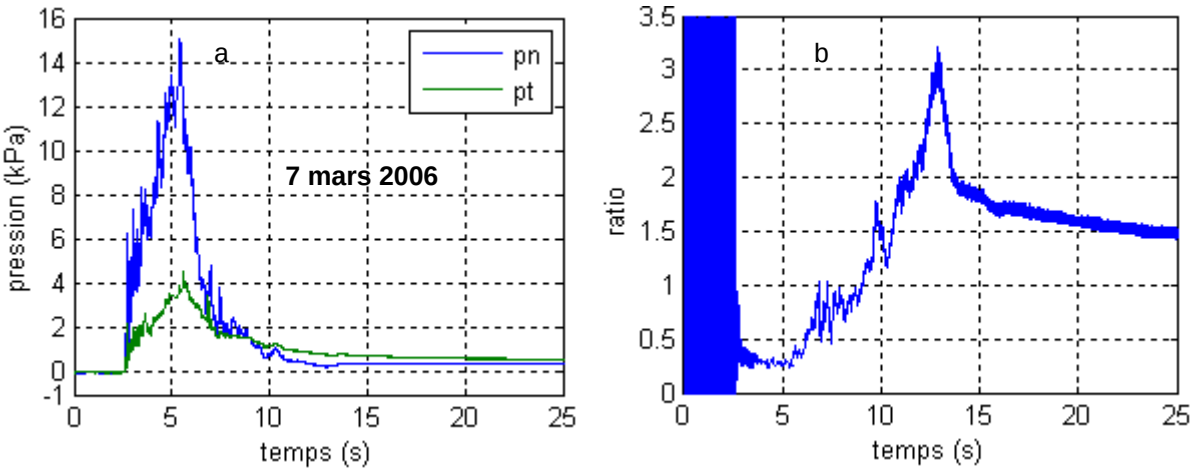


Figure 4.3 Avalanche déclenchée au 7 mars 2006 : a. Pressions normales et tangentielles b. Ratio.

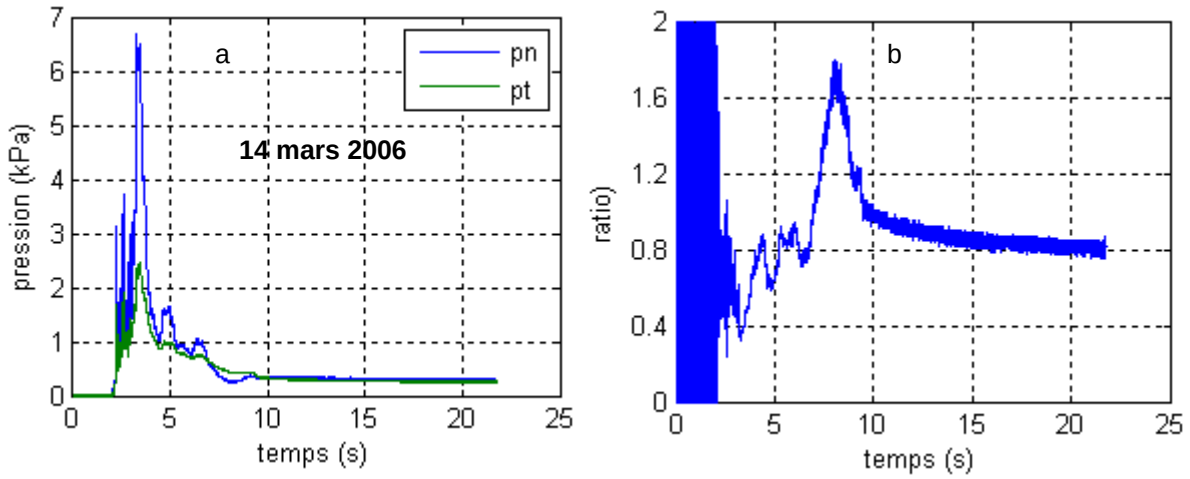


Figure 4.4 Avalanche déclenchée au 14 mars 2006 : a. Pressions normales et tangentielles b. Ratio.

Ceci peut s'expliquer par le fait que l'avalanche arrêtée vient mettre en pression le capteur. Une masse de neige met en pression la partie supérieure du capteur et conduit à avoir un effort tangentiel supplémentaire. Ce problème a été déjà envisagé avant l'installation du capteur, la solution étant de mettre une butée en amont du capteur. Entre la butée et le capteur, nous avons laissé une petite distance d (voire le schéma simplifié 4.5). Pour éviter le contact de la butée sur le capteur, il ne faut pas que la distance d soit trop faible. Mais elle ne doit pas être très grande non plus, car il y a risque d'accumulation de neige et de glace qui peut lier les deux éléments de la structure ensemble. Pendant la première campagne de mesure, nous craignions plutôt le deuxième cas et mettions une distance faible. D'après les résultats présentés avant, nous concluons que la distance laissée pendant la première campagne de mesure était trop petite. Pendant la deuxième campagne de mesure, nous avons laissé une distance plus importante, et nous avons obtenu des résultats plus cohérents.

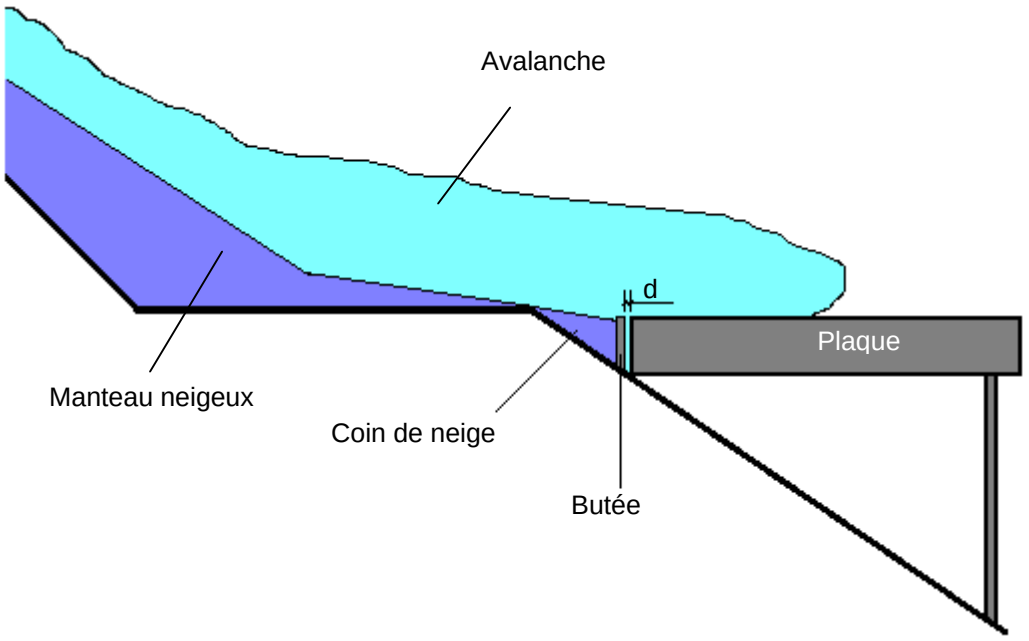


Figure 4.5 Schéma simplifié de la butée en amont du capteur.

4.1.2.2 Saison hivernale 2006-2007

En saison hivernale 2006-2007, grâce à la deuxième plaque en parallèle, nous avons pu obtenir deux séries de pressions d'impact pour chaque déclenchement. Nous montrons dans la figure 4.6 les résultats de l'avalanche du 15 février 2007. D'après les figures 4.6 a et c, les valeurs des pressions sur deux plaques sont similaires. Par contre, les deux courbes sont décalées au début de l'écoulement. L'avalanche est passée essentiellement sur la plaque de gauche pendant les 5 premières secondes puis sur les deux plaques.

Les pressions sont assez faibles, de 3 ~ 4 kPa pour la pression normale et 1 ~ 1,5 kPa pour la pression tangentielle. La durée du « pic » est d'une dizaine de secondes. Le ratio pt/pn au cours de l'écoulement est compris entre 0,2 à 0,6, et après le passage de l'écoulement, le ratio de la plaque gauche reste à 0,4 et celui de la plaque droite est d'environ 0,3. Ce sont des valeurs relativement proches de $tg(10°) = 0{,}18$.

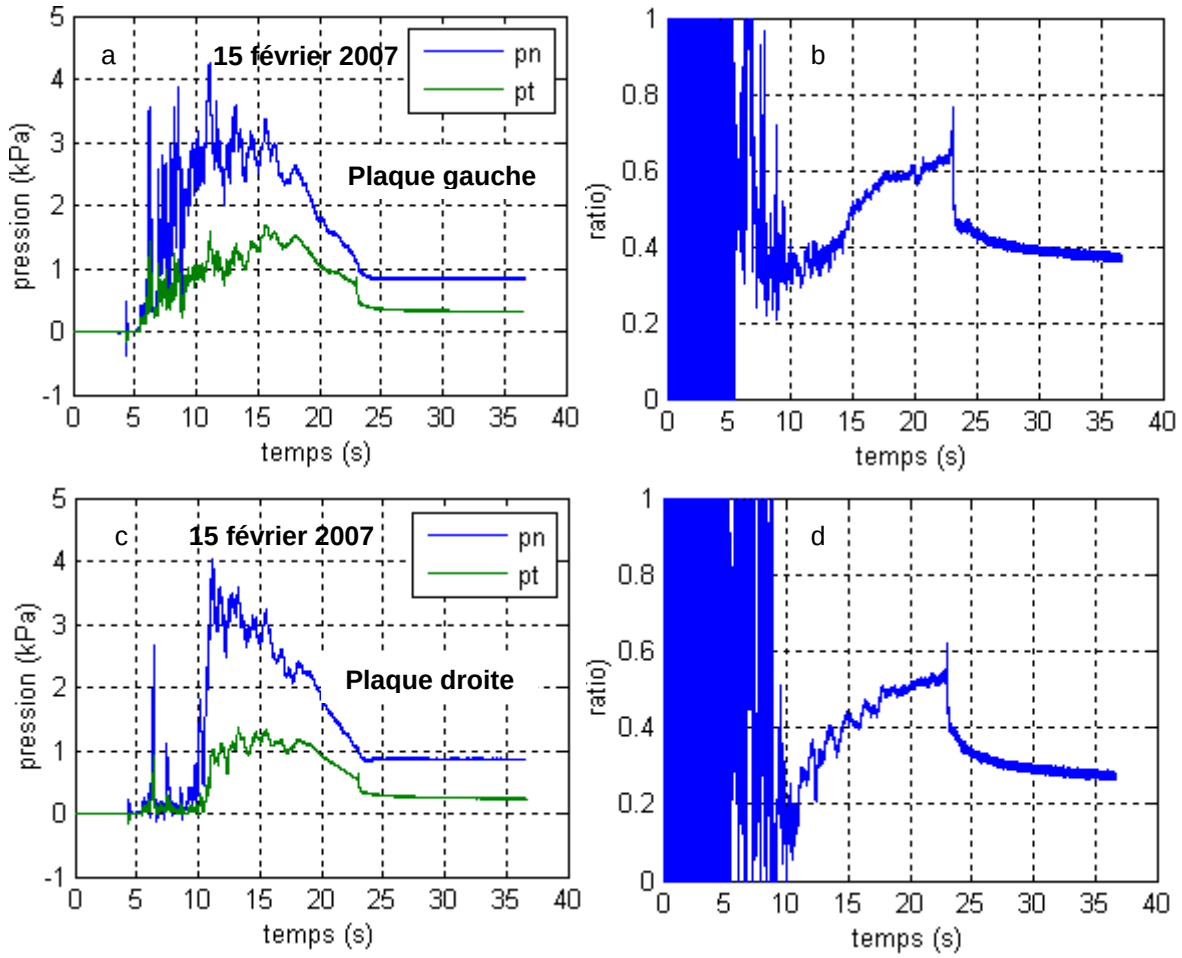


Figure 4.6 Avalanche du 15 février 2007.

La figure 4.7 présente les résultats de l'avalanche du 27 février 2007. La durée du « pic » est entre 5 et 10 secondes, c'est une durée moyenne par rapport aux autres cas montrés précédemment. Le ratio pt/pn est entre 0,2 et 0,65.

Nous avons remarqué que pendant la deuxième campagne de mesure, le ratio mesuré avec la plaque droite est toujours plus petit que celui mesuré avec la plaque gauche, et dans la partie après l'écoulement, celui de la plaque droite est toujours plus proche de $tg(10°) = 0{,}18$. Cela montre que la butée contre la poussée de la neige pour la plaque droite a été mieux dimensionnée par rapport à celle de la plaque gauche. Nous considérons donc le ratio de la plaque droite comme étant plus cohérent.

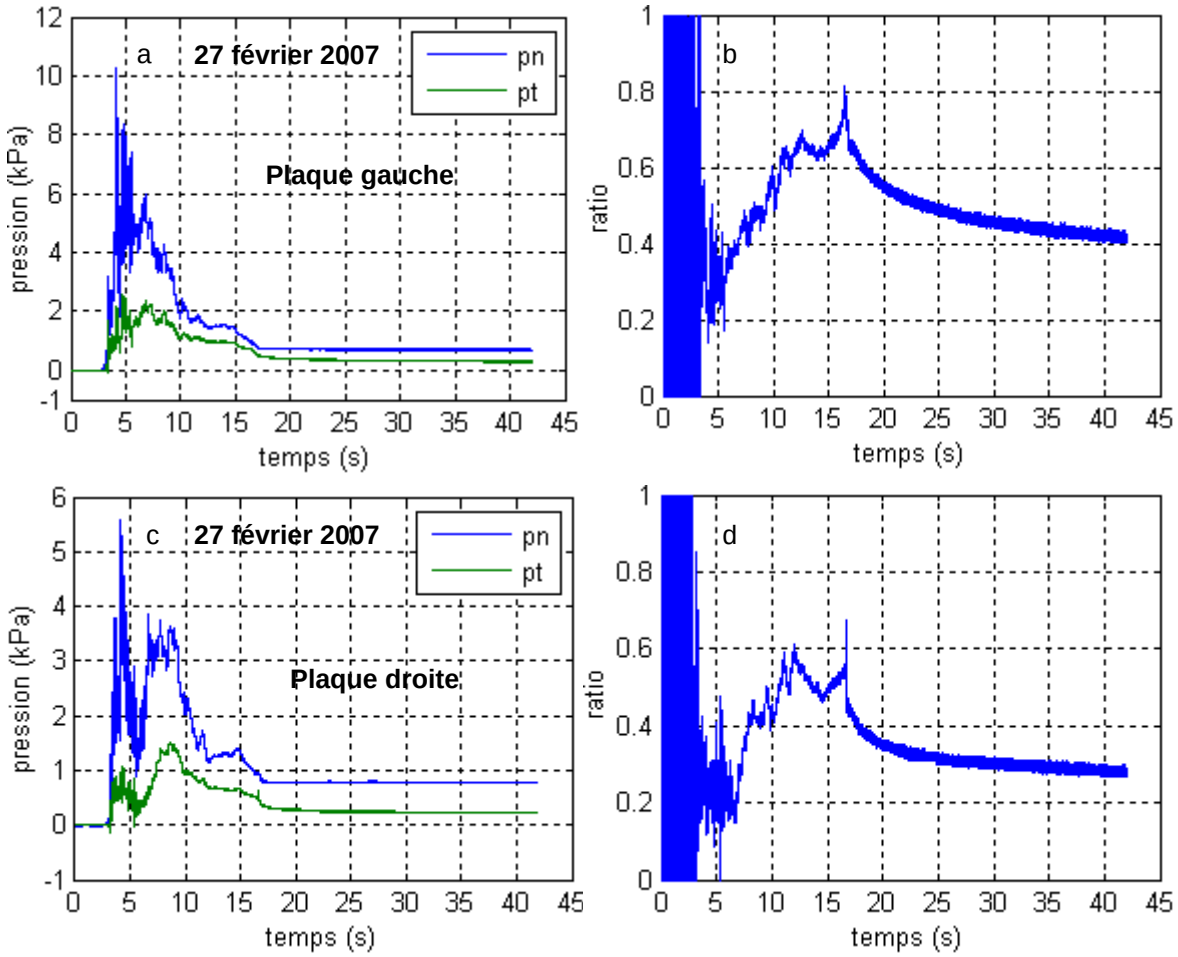


Figure 4.7 Avalanche du 27 février 2007.

4.1.3 Application de la formule de calcul des pressions normales et tangentielles

L'objectif est de vérifier ici si les formules de dimensionnement couramment utilisées par les ingénieurs permettent de retrouver les résultats expérimentaux en terme de pressions normales et tangentielles. La méthode de calcul des pressions exercées par l'écoulement sur une structure de protection a été présentée dans le chapitre 1. La pression normale est définie par :

$$p_n = \rho_0 V_0^2 \frac{h_0}{L} \sin\beta$$

et la pression tangentielle $p_t = c * p_n$, c étant souvent compris entre 0,2 et 0,4 selon les experts français et entre 0,2 ~ 0,6 selon la nouvelle norme suisse 2007. Nous utilisons ici les valeurs utilisées par les experts français. ρ_0, V_0, h_0 sont les caractéristiques de l'écoulement avant le changement de pente. Nous prenons ici les valeurs basées sur les valeurs de mesure listées dans le tableau 4.1. Pour la densité ρ_0, nous n'avons que les valeurs de la neige au repos. Pour la densité au cours de l'avalanche, la valeur doit être comprise entre la valeur minimale correspondant à la masse volumique au départ et une valeur maximale qui correspond à la valeur dans le dépôt. Nous prenons la moyenne de ces deux valeurs. Pour la vitesse V_0, les valeurs dont nous disposons correspondent au front de l'avalanche et l'approximation qui consiste à dire que la vitesse est pratiquement constante pendant tout l'écoulement n'est pas aberrante. Pour la hauteur h_0, au niveau du capteur, nous n'avons que les valeurs de l'ensemble de la couche dense et de la couche de saltation. Les épaisseurs de la partie dense seule sont inconnues.

Dans un premier temps, nous utilisons les valeurs mesurées. L'angle et la longueur de déviation β et L sont variables selon les différentes épaisseurs de manteaux neigeux. Nous n'avons pas mesuré précisément ces valeurs avant chaque déclenchement. Selon les expériences, nous avons pris une valeur moyenne de 25° pour β et de 8 mètres pour L. A partir des caractéristiques expérimentales mesurées et supposées, nous avons déterminé les pressions normales et tangentielles « théoriques ». Les calculs et résultats expérimentaux sont montrés dans le tableau 4.3. Les pressions calculées sont beaucoup plus importantes que les valeurs maximales de pressions mesurées. Le rapport entre les deux valeurs va de 93 % à 500 %.

Avalanche	ρ_0 (kg/m^3)	V_0 (m)	h_0 (m)	Pn_cal (kPa)	Pn_max mesurée (kPa)	Ecart (%)
21-févr-06	180	13,6	1,57	2,8	0,9	211
07-mars-06	250	25	3,5	28,9	15	93
14-mars-06	250	19,3	3,5	17,2	6,8	153
15-févr-07 (gauche)	225	25	3,5	26,0	4,2	519
15-févr-07 (droite)	225	25	3,5	26,0	4,0	550
27-févr-07 (gauche)	220	29	3,5	34,2	10,4	229
27-févr-07 (droite)	220	29	3,5	34,2	5,7	500

Tableau 4.3 Comparaison des pressions mesurées et calculées de cinq avalanches de neige.

Le grand écart peut être dû à plusieurs facteurs, mais le facteur le plus évident est la hauteur de l'avalanche appliquée h_0. La hauteur de la partie dense est une valeur inconnue et elle doit être beaucoup plus faible que celle de la hauteur de la couche de saltation. Par curiosité, nous avons calculé la hauteur de la partie dense à partir des pressions normales mesurées. Les résultats sont listés dans le tableau 4.4. La comparaison entre les hauteurs denses estimées et les hauteurs totales est effectuée dans le tableau 4.5. Compte tenu de la forte variation du ratio entre la hauteur de la couche dense h_1 et la hauteur de la couche de saltation h_2, nous trouvons qu'il paraît difficile de d'indiquer une tendance générale, même pour une même nature d'avalanche.

Pour vérifier le coefficient de friction, nous avons calculé les pressions tangentielles maximales à partir des pressions normales maximales multipliées par 0,4. Les résultats sont également présentés dans le tableau 4.4. Les pressions tangentielles calculées sont du même ordre de grandeur de celles mesurées.

Avalanche	Pn_max mesurée (kPa)	h_0_dense estimée (m)	Pt_cal (kPa)	Pt_max mesurée (kPa)
21-févr-06	0,9	0,51	0,36	0,45
07-mars-06	15	1,82	6	4,5
14-mars-06	6,8	1,38	2,72	2,4
15-févr-07 (gauche)	4,2	0,57	1,68	1,7
15-févr-07 (droite)	4,0	0,54	1,6	1,2
27-févr-07 (gauche)	10,4	1,06	4,16	2,8
27-févr-07 (droite)	5,7	0,58	2,28	1,4

Tableau 4.4 Estimation de l'épaisseur de la partie dense de l'avalanche et vérification du coefficient de friction.

Avalanche	Pn_max mesurée (kPa)	Hauteur de la couche dense h_1 (m)	Hauteur de la couche de saltation h_2 (m)	h_1/ h_2 (%)
21-févr-06	0,9	0,51	1,57	32
07-mars-06	15	1,82	3,5	52
14-mars-06	6,8	1,38	3,5	39
15-févr-07 (gauche)	4,2	0,57	3,5	16
15-févr-07 (droite)	4,0	0,54	3,5	15
27-févr-07 (gauche)	10,4	1,06	3,5	30
27-févr-07 (droite)	5,7	0,58	3,5	17

Tableau 4.5 Comparaison entre hauteurs de la couche dense calculées et hauteurs de la couche de saltation mesurées.

4.1.1.4 Calcul d'incertitude

Pour évaluer les erreurs qui se produisent lors de mesure, nous avons effectué un calcul d'incertitudes. Le calcul permet de vérifier la relation entre différentes grandeurs physiques. D'après la formule 4.1, p_n est en fonction de cinq paramètres. La plus grande erreur absolue de p_n peut donc être définie comme la suivante :

$$dp_n(\rho_0, V_0, h_0, L, \beta) = \frac{\partial p_n(\rho_0, V_0, h_0, L, \beta)}{\partial \rho_0} d\rho_0 + \frac{\partial p_n(\rho_0, V_0, h_0, L, \beta)}{\partial V_0} dV_0 + \frac{\partial p_n(\rho_0, V_0, h_0, L, \beta)}{\partial h_0} dh_0$$

$$+ \frac{\partial p_n(\rho_0, V_0, h_0, L, \beta)}{\partial L} dL + \frac{\partial p_n(\rho_0, V_0, h_0, L, \beta)}{\partial \beta} d\beta \qquad (4.1)$$

$$\Leftrightarrow$$

$$dp_n(\rho_0, V_0, h_0, L, \beta) = V_0^2 \frac{h_0}{L} \sin\beta d\rho_0 + \rho_0 2V_0 \frac{h_0}{L} \sin\beta dV_0 + \rho_0 V_0^2 \frac{1}{L} \sin\beta dh_0 - \rho_0 V_0^2 \frac{h_0}{L^2} \sin\beta dL$$

$$+ \rho_0 V_0^2 \frac{h_0}{L} \cos\beta d\beta \qquad (4.2)$$

Nous estimons ensuite les incertitudes maximales probables sur les différents paramètres :

$\Delta\rho$: 50 kg/m^3
ΔV : 2 m/s
Δh : 1,5 m
ΔL : 1 m
$\Delta\beta$: 5 °

Les incertitudes des pressions normales de chaque avalanche sont présentées dans le tableau 4.6.

Date	21-févr-06	07-mars-06	14-mars-06	15-févr-07	27-févr-07
dp_n (kPa)	± 2,1	± 9,6	± 3,5	± 7,1	± 10,7
Pn_max (kPa)	4,9	38,5	20,7	33,1	44,9
Pn_min (kPa)	0,7	19,3	13,7	18,9	23,5
Pt_max (kPa)	1,9	15,4	8,3	13,2	18,0
Pt_min (kPa)	0,3	7,7	5,5	7,6	9,4

Tableau 4.6 Erreur absolue sur la pression normale calculée d'après les mesures de grandeurs physiques.

En appliquant ces valeurs dans la formule 4.2, nous avons obtenu les erreurs maximales (positives et négatives) sur la pression normale. En faisant la somme avec les valeurs calculées selon la théorie (tableau 4.5), les valeurs maximales et minimales des pressions normales et tangentielles ont pu être déterminées. Les « pressions minimales » sont plus proches des valeurs mesurées mais il existe quand même des décalages importants.

Conclusion

Dans ce chapitre 4.1, nous avons présenté les résultats expérimentaux issus de cinq avalanches de neige déclenchées au Col du Lautaret. Les capteurs nous ont permis d'obtenir les pressions normales et tangentielles de l'avalanche de neige sur une structure peu inclinée (ici 10°). Selon différents scenarii d'avalanches, la valeur maximale de la pression normale varie de quelque kilo pascal à une dizaine kilo pascal, et celle de la pression tangentielle est de 1 à 4 kPa. Ce sont des valeurs moyennes plutôt faibles parmi celles ce que nous pouvons trouver dans la littérature. Cela est dû à la taille du site de Lautaret. Ce site expérimental est le site le plus grand en France, mais sa taille reste quand même relativement petite par rapport à d'autres sites expérimentaux (Sionne-Anzère de Suisse par exemple) ou couloirs naturels. Malgré tout, ces mesures de pressions d'impact avec des avalanches de neige réelles nous ont permis d'obtenir les bases de données intéressantes, car ce type de mesure a été rarement fait. Nous avons les travaux de [K.Plazter 2006], mais les mesures ont été faites avec des écoulements de neige dans un canal incliné. La neige est donc compactée et la vitesse de l'écoulement est très faible (entre 4 à 10 m/s).

Puis, différents comportements de chargements ont été observés grâce aux enregistrements temporels. Nous avons des chargements qui ont un pic remarquable correspondant à une

durée très courte (avalanches du 7 mars, 14 mars 2006), ou des chargements qui ont un « pic » étalé correspondant à une durée d'une dizaine secondes (avalanches du 15 février, 27 février 2007), ou enfin un chargement avec un palier (avalanche du 21 février 2006). Le comportement du chargement est beaucoup lié aux caractéristiques d'une avalanche, dont aux propriétés de la neige, sa vitesse, son volume et sa densité. La grande variabilité de ces paramètres entre les différentes avalanches explique la grande variation des comportements de celles-ci.

Quant au ratio entre la pression tangentielle et la pression normale, les valeurs de la première campagne de mesure sont aberrantes à cause du problème de la poussée supplémentaire sur le capteur. Par contre, avec l'amélioration du système de mesure, les valeurs de la deuxième campagne de mesure sont plus cohérentes. Le ratio semble s'étaler entre 0,2 et 0,6, il est par conséquent plus important que la fourchette utilisée par les experts français (entre 0,2 et 0,4) et proche des valeurs expérimentales de [K.Plazter 2006] sur avalanches mixtes. Cela montre une sous estimation du coefficient de friction et donc des efforts tangentiels.

Enfin, nos expériences confirment la variabilité et la complexité de l'avalanche de neige. Sur un même site, dans un même couloir, nous avons obtenu 5 avalanches très différentes. De plus, les méthodes de mesure des caractéristiques de l'avalanche sont très limitées. La densité au cours de l'écoulement et l'épaisseur de la partie dense ne peuvent pas être déterminées avec précision. La mesure de la vitesse d'écoulement n'est pas précise non plus. Tout cela mène à la conclusion qu'il est impossible de tirer des conclusions générales et définitives de ces cinq avalanches.

4.2 Résultats des expérimentations sur les écoulements granulaires dans un canal incliné

4.2.1 Introduction

Dans les paragraphes suivants nous allons traiter et analyser les résultats expérimentaux sur les écoulements granulaires en régime accéléré dans un canal incliné. La première partie sera basée sur les caractéristiques de l'écoulement. Dans une deuxième partie, nous allons nous intéresser aux évolutions temporelles et spatiales des sollicitations exercées par les différents écoulements sur le canal inférieur. Dans la dernière partie, nous allons présenter les sollicitations calculées avec la méthode d'ingénieur en utilisant les mesures des caractéristiques de l'écoulement. Les comparaisons avec les sollicitations mesurées seront présentées à la fin de ce chapitre.

4.2.2 Caractéristiques des écoulements en fonction des ouvertures initiales

Nous entendons par caractéristiques des écoulements : la hauteur, la vitesse et la densité avant et après le changement de pente. Ces caractéristiques sont celles qui sont prises en compte dans les modèles simplifiés et nous espérons par ces expérimentations pouvoir faire un recalage de ces modèles. Rappelons également que la position de la mesure avant le changement de pente est située 50 cm en amont, et celle après le changement de pente se trouve au centre de la position du capteur. Pour simplifier l'appellation, nous les appellerons positions amont et aval de la rupture.

4.2.2.1 Hauteur

Ecoulements avec une ouverture initiale de porte à 20 cm

Pour mieux comprendre le comportement de l'écoulement, nous montrons d'abord le niveau de gris en fonction du temps correspondant à la position de mesure (voir la figure 4.8). Sur la figure, nous avons remarqué qu'il y a un pic au début de l'écoulement. Après le pic, l'épaisseur de l'écoulement diminue et un régime quasi permanent est maintenu. A la fin de l'écoulement, le niveau de gris est très variable, cela signifie l'existence d'une forte perturbation de l'écoulement.

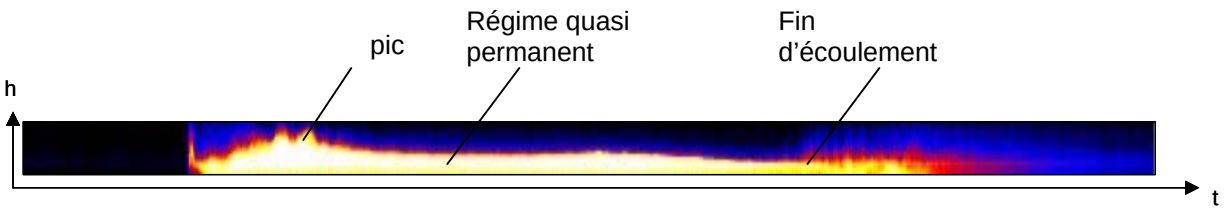


Figure 4.8 Niveau de gris en fonction du temps à la position de mesure en amont du canal de l'écoulement avec une ouverture initiale à 20 cm.

- Hauteur en fonction du temps en amont de la rupture

La figure 4.9 montre les épaisseurs de l'écoulement en fonction du temps de quatre essais identiques mesurées en amont de la rupture pour une ouverture initiale de porte de 20 cm. La

reproductibilité des résultats est assez bonne. Pour ces essais, les valeurs des épaisseurs de l'écoulement atteignent rapidement une valeur maximale d'environ 5 cm au début de l'écoulement. Puis elles décroissent ensuite jusqu'à 2,3 cm et maintiennent un régime permanent pendant une courte période, enfin elles continuent à diminuer jusqu'à la fin de l'écoulement. Grâce au système de détermination du temps initial, nous avons pu estimer le temps de parcours du front d'écoulement sur une distance entre la porte d'ouverture et la position de mesure. Pour les essais à 20 cm d'ouverture initiale, ce temps de parcours est d'environ 1,26 s pour une distance de parcours de 4,5 mètres. Sur la figure 4.9, les courbes commencent au temps 1,68 s. C'est à dire que, sur une durée de 0,42 s, l'épaisseur de l'écoulement n'a pas pu être mesurée. Cette période correspond à l'arrivée du front d'écoulement souvent accompagné d'ondes de propagation diffuses et perturbées, qui ne permet pas de distinguer clairement la position du faisceau laser sur les images. En outre, la vitesse de la caméra normale n'est pas très élevée (25 images/s), il n'est donc pas facile de capturer les fortes variations de la position du faisceau laser dans cette zone de perturbation.

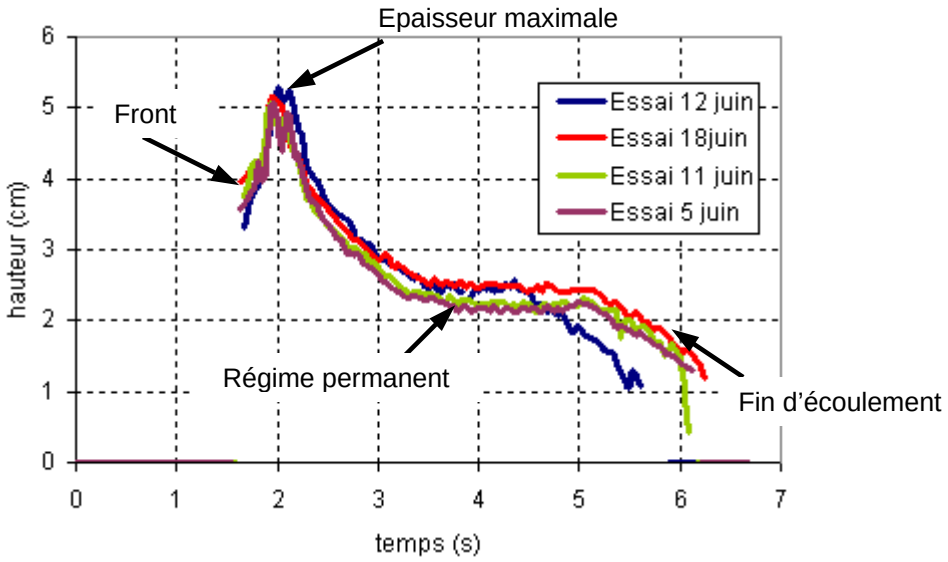


Figure 4.9 Hauteurs d'écoulements mesurées en amont de la rupture pour 4 essais avec une ouverture initiale de 20 cm.

- Hauteur en fonction du temps en aval de la rupture

La hauteur d'écoulement en fonction du temps aux différentes positions après la rupture de pente est présentée dans la figure 4.10 a. Les mêmes formes de courbes que celles en amont du canal ont été retrouvées. Les épaisseurs maximales ont une augmentation de 0,7 à 1,8 cm par rapport à l'épaisseur maximale avant la rupture selon différentes positions de la mesure (voir figure 4.10 b). Dans la partie du régime permanent, la différence entre les épaisseurs à différente position de mesure est négligeable. L'augmentation est d'environ 0,6 cm comparée à l'épaisseur avant la rupture dans le régime permanent.

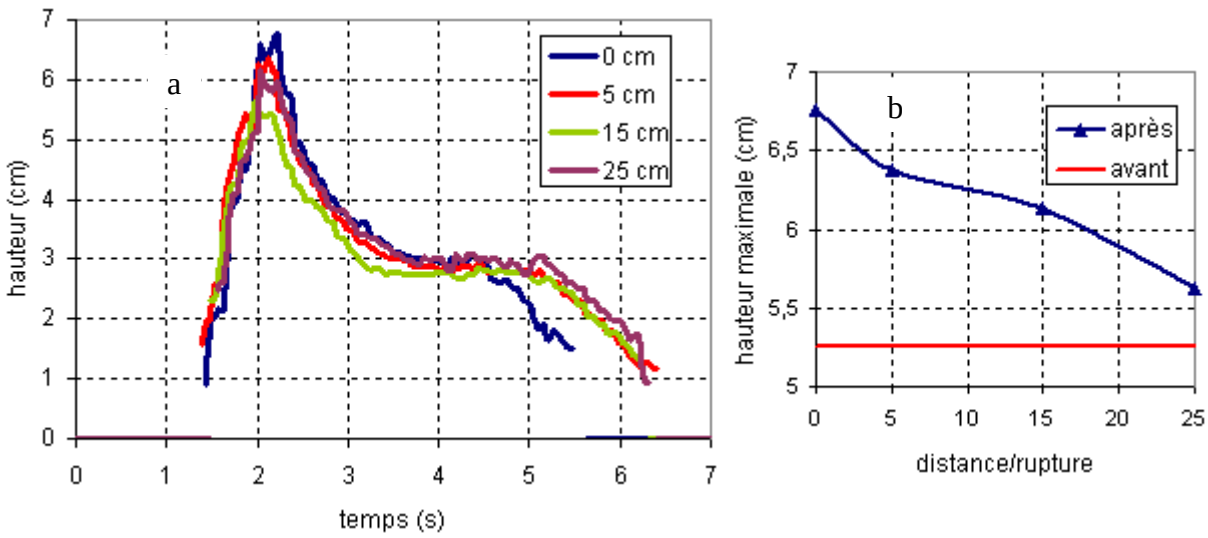


Figure 4.10 Hauteurs d'écoulements mesurées à la position du capteur après la rupture de pente pour 4 essais avec une ouverture initiale de 20 cm.

Ecoulements avec une ouverture initiale à 15 cm

Pour les essais à 15 cm d'ouverture initiale, nous avons obtenu des résultats inattendus. D'après la figure 4.11, nous pouvons voir que le pic de hauteur se trouve au milieu de l'écoulement.

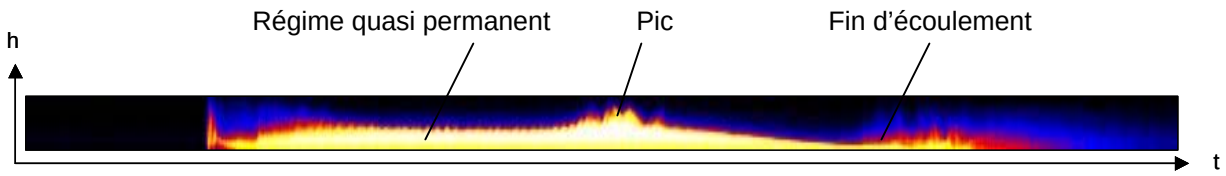


Figure 4.11 Niveau de gris en fonction du temps à la position de mesure en amont du canal de l'écoulement avec une ouverture initiale à 20 cm.

- Hauteur en fonction du temps en amont du canal

Contrairement au cas précédent (20 cm d'ouverture initiale), nous commençons par un régime pseudo-permanent puis après nous retrouvons un pic (voir figure 4.12). Après avoir atteint les valeurs maximales, la hauteur décroît rapidement jusqu'à la fin d'écoulement. Pour chaque essai, les pics des hauteurs maximales apparaissent toujours en fin d'écoulement, néanmoins nous pouvons nous apercevoir que les temps sont légèrement différents en fonction des essais. Comme ce phénomène a été retrouvé pour chaque essai à 15 cm d'ouverture, nous en déduisons que c'est un phénomène reproductible. Nous pensons qu'il est lié à la création d'un faciès particulier de rupture au sein du matériau dans la partie amont de la porte.

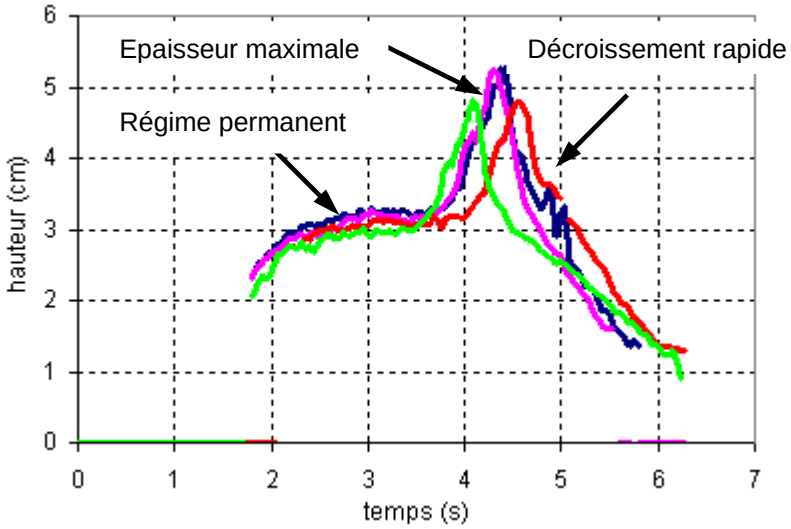


Figure 4.12 Hauteurs d'écoulements mesurées en amont du canal pour 4 essais avec une ouverture initiale de 15 cm.

- Hauteur en fonction du temps en aval de la rupture

Comme les écoulements avec une ouverture initiale à 20 cm, la forme des courbes est similaire à celle en amont. L'augmentation des hauteurs maximales est d'environ 1 cm. Quant à la partie des hauteurs quasi constantes (régime quasi permanent), l'augmentation varie entre 0,25 et 1 cm par rapport à la hauteur maximale en amont.

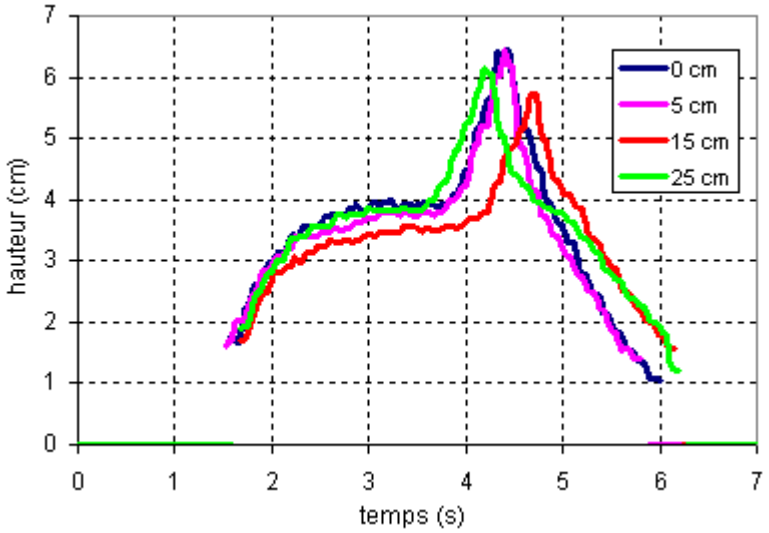


Figure 4.13 Hauteurs d'écoulements mesurées à la position du capteur après la rupture de pente.

Ecoulements avec une ouverture initiale à 10 cm

La figure 4.14 montre le comportement de l'écoulement avec une ouverture initiale à 10 cm. Le profil de niveau de gris est quasi constant au cours du temps, cela signifie que du fait du faible débit, l'écoulement atteint rapidement un régime quasi permanent.

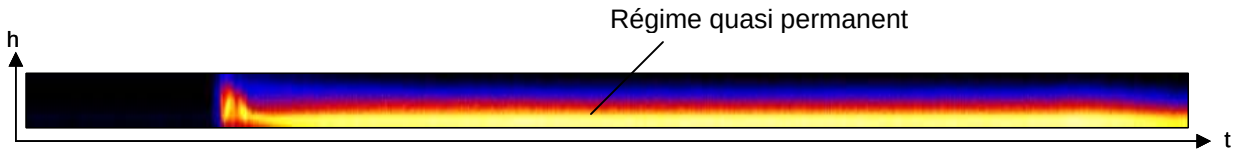


Figure 4.14 Niveau de gris en fonction du temps à la position de mesure en amont du canal de l'écoulement avec une ouverture initiale à 20 cm.

- Hauteur en fonction du temps en amont de la rupture

Les épaisseurs en fonction du temps sont quasi constantes tout le long de l'écoulement (voir figure 4.15). La durée de l'écoulement est plus longue que les autres écoulements. Le temps de parcours du front d'écoulement est d'environ 1,4 s.

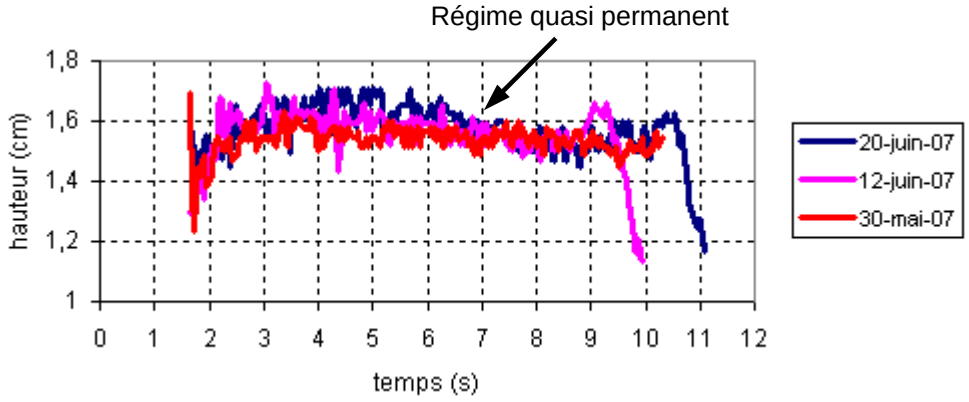


Figure 4.15 Hauteurs d'écoulements mesurées 50 cm avant la rupture de pente avec une ouverture initiale de 10 cm.

- Hauteur en fonction du temps en aval du canal

En aval du canal, après le changement de pente, la variation temporelle et spatiale de la hauteur d'écoulement reste toujours constante. Une légère augmentation de hauteur de l'ordre 1 à 2 mm a été remarquée pour chaque position de mesure (voir la figure 4.16). D'après les courbes, la hauteur à la position 25 cm après changement de pente a une valeur plus élevée.

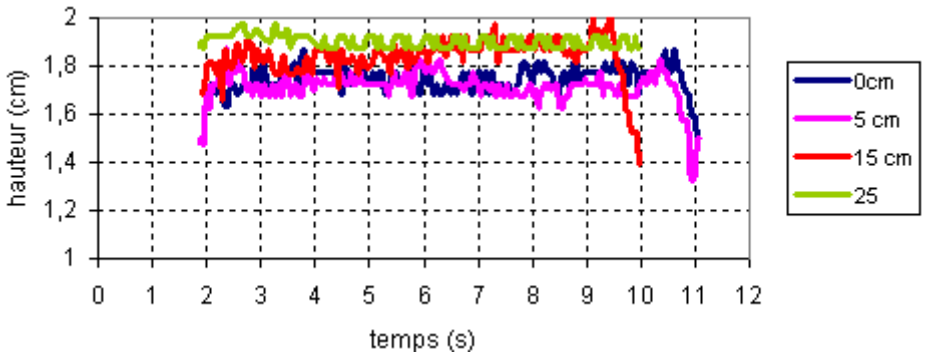


Figure 4.16 Hauteurs d'écoulements mesurées à la position du capteur après la rupture de pente.

Synthèse

Les résultats de la hauteur de l'écoulement en fonction du temps nous ont permis de visualiser les comportements des écoulements sous trois ouvertures de portes différentes. La différence entre les comportements des trois types d'écoulement est remarquable. Il est montré que l'ouverture initiale (débit initial) a une influence importante sur le comportement de l'écoulement. Pour les essais avec une ouverture initiale à 20 cm, le comportement de l'écoulement est similaire à celui des avalanches de neige déclenchées au col du Lautaret. Pour les essais avec une ouverture initiale à 15 cm, les pics de la hauteur se trouvent en fin d'écoulement. Cela est peut être dû au fait qu'à cette hauteur d'ouverture, il y a tout d'abord vidange des billes situées juste derrière de la porte, puis après une certaine quantité de billes écoulées, un piston de bille est libéré soudainement, certainement suite à la rupture de voutes dans la trémie. Cela mène à une épaisseur élevée au milieu de l'écoulement. Enfin, le régime quasi permanent des écoulements avec une ouverture initiale à 10 cm a été observé.

Par contre, la méthode de mesure de la hauteur ne permet pas de s'assurer que nous mesurons l'épaisseur de la partie de l'écoulement qui est très agitée et diluée. Autrement dit, les hauteurs que nous avons mesurées ne correspondent certainement qu'à celles de la partie dense. D'après les images filmées par les caméras rapides à travers la paroi transparente, plusieurs couches de différentes densités ont été observées. La couche la moins dense atteint souvent une hauteur d'environ 7 ou 8 cm. La comparaison entre les valeurs d'épaisseurs mesurées par le laser et les hauteurs de couche denses mesurées latéralement montre que ces dernières sont généralement un peu plus importantes. La différence peut s'expliquer à la fois par des effets de bords et une certaine pénétration du faisceau laser dans le lit de billes.

4.2.2.2 Profil de vitesse et températures granulaires

Sur la figure 4.17 est représenté le profil de vitesse théorique des écoulements avalancheux [Platzer 2006]. C'est un profil composé d'une partie de type Bagnold (partie inférieure) et d'une partie quasi constante. La figure 4.17 montre également le profil d'énergie de fluctuation des particules. L'énergie de fluctuation des particules est proportionnelle à la « température granulaire » T. La température granulaire est la moyenne des composantes fluctuantes de la vitesse des particules. Elle est définie par la formule suivante :

$$T = \left\langle \left(v_i - \bar{v} \right)^2 \right\rangle \tag{4.1}$$

v_i étant la vitesse de chaque particule, $\bar{v}$ la vitesse moyenne des particules. La température granulaire représente l'agitation des particules. Selon les différentes valeurs de l'énergie de fluctuation, le profil de l'avalanche peut être divisé en trois parties : slip volume, fluidized layer et flow bulk. 'Slip volume', ou couche de base glissante, est la partie où l'énergie de fluctuation croit de 0 jusqu'à une valeur maximale. 'Fluidized layer', ou couche fluidisée, correspond la partie où l'énergie de fluctuation diminue de la valeur maximale jusqu'à 0. 'Flow bulk', ou écoulement grossier, est la partie en dessus où théoriquement l'énergie de fluctuation est nulle.

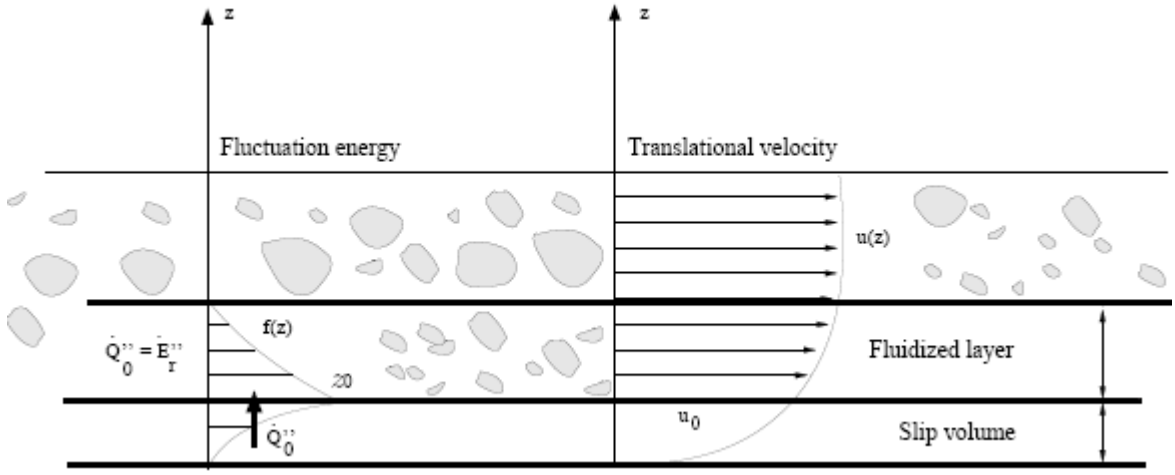


Figure 4.17 Profil d'écoulement avalancheux constitué de trois couches différentes [Platzer 2006].

Comme nous l'avons montré dans le chapitre 3.2, les déplacements obtenus à l'aide du logiciel WIMA sont des déplacements moyennés des petites zones d'images (les mailles). Le nombre de vecteurs de déplacement calculés dépend donc de la taille de ces zones. Par exemple, pour une taille de maille de 16*16 pixels, à une certaine hauteur donnée, sur toute la largeur d'une image, nous avons 16 vecteurs de déplacement ou vitesse calculables (la largeur d'une image est de 256 pixels). Nous calculons la moyenne de ces vecteurs et de leurs composantes fluctuantes. En appliquant ensuite la formule 4.1, nous obtenons la valeur de la température granulaire à une hauteur donnée. Après application de ces calculs sur toute la hauteur, nous obtenons finalement le profil de température de l'écoulement. En réalité, à cause de la qualité des images et des problèmes de traitement numériques de celles-ci, nous avons souvent entre 10 et 13 valeurs valables au lieu de 16 sur une verticale.

Comme expliqué dans le paragraphe 4.2.1.1, la hauteur de l'écoulement présente une grande variabilité en fonction du temps pour les écoulements de grandes ouvertures initiales. Il n'est donc pas possible de généraliser ou moyenner la vitesse selon toute la durée de l'écoulement. Il est également impossible de calculer la vitesse à chaque pas de temps, car cela demande trop de traitement informatique pour peu d'informations récupérées. Pour diminuer le traitement et à la fois capturer le plus possible d'informations intéressantes, nous avons choisi plusieurs moments typiques au cours de l'écoulement et calculé les profils de vitesse correspondants.

Ecoulements avec une ouverture initiale à 20 cm

- Profil de vitesse et de température granulaire en amont du canal

Pour les écoulements avec une ouverture initiale à 20 cm, nous prenons les moments où l'écoulement atteint sa hauteur maximale, nommé t_1, et son régime permanent, nommé t_2. Selon les courbes de la figure 4.18, t_1 et t_2 sont environ 2 s et 4 s après l'ouverture de porte. Nous calculons ensuite le profil des vitesses à partir de ces images. Pour éviter ou diminuer les erreurs numériques, comme nous l'avons présenté dans le chapitre 3.2, nous avons moyenné les résultats sur une dizaine d'images autour de ces moments précis.

La figure 4.18 a montre le profil de vitesse au moment t_1= 2 secondes après l'ouverture de la porte. Sur la courbe, nous trouvons que, entre 0 et 0,5 cm de hauteur, les vitesses sont quasi nulles, définissant ainsi une zone morte. Entre 0,5 et 2 cm de hauteur, le gradient de vitesse est très important, ce qui signifie que le taux de cisaillement d'écoulement est très élevé (couche limite). Au-delà, la vitesse atteint une valeur maximale d'environ 4 m/s, et elle reste relativement constante. La forme théorique du profil d'énergie cinétique (voir figure 4.17) est retrouvée.

La figure 4.18 b montre le profil de température granulaire. La valeur maximale de la température granulaire est située à la hauteur de 0,85 cm. A partir de 2 cm, les valeurs de la température granulaire sont quasiment nulles. Ces deux points permettent de diviser l'écoulement en trois couches : la couche de la base glissante qui est entre 0 et 0,85 cm, la couche fluidisée qui se trouve entre 0,85 et 2 cm et la partie supérieure de l'écoulement qui est au-dessus de 2 cm.

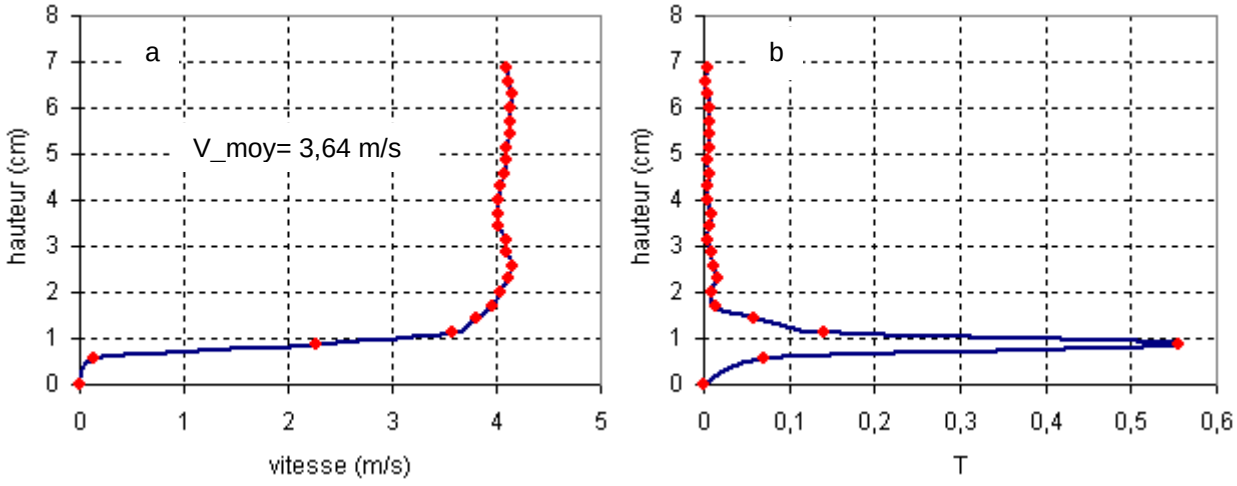


Figure 4.18 Front de l'écoulement (2 s après l'ouverture de la porte) a. Profil de vitesse de l'écoulement. b. Profil de température granulaire (essai du 12 juin 2007).

Nous montrons sur la figure 4.19 le profil de vitesse et de température granulaire de l'écoulement dans le « régime quasi permanent » (4 s après l'ouverture de la porte). La forme du profil de vitesse est similaire de celle de type Bagnold.

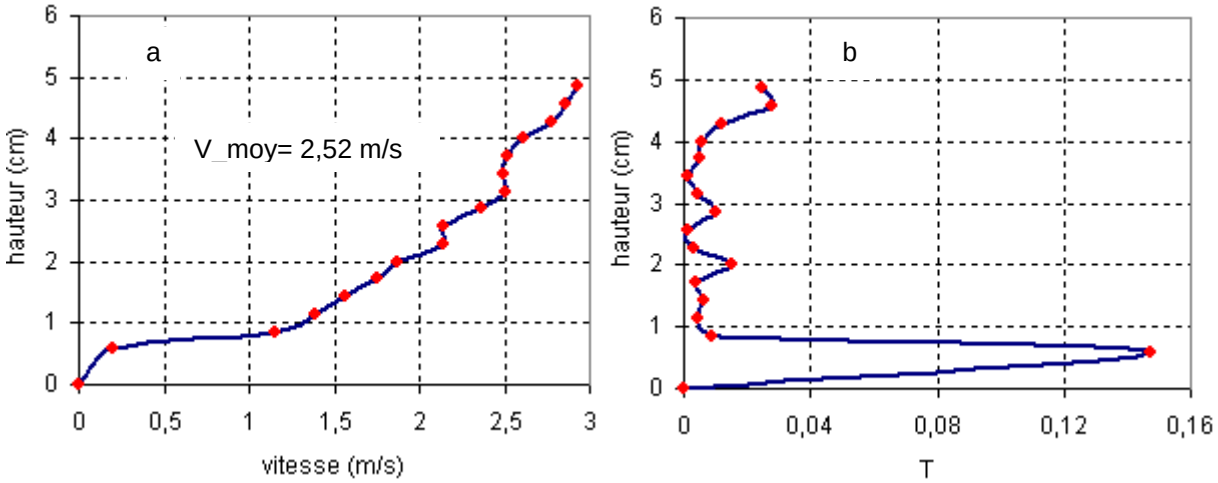


Figure 4.19 Régime permanent (4s après l'ouverture de la porte) : a. Profil de vitesse de l'écoulement. b. Profil de température granulaire.

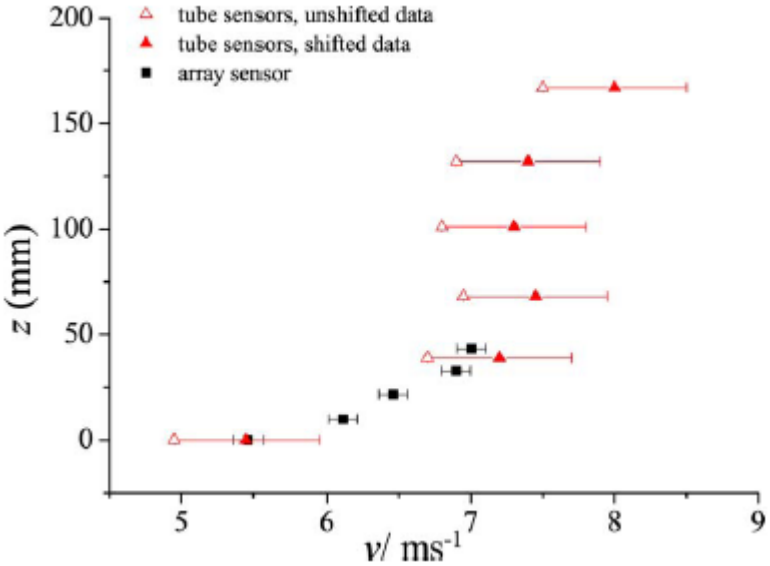


Figure 4.20 Mesure expérimentale du profil de vitesse de l'écoulement de neige en canal [Kern et al. 2004].

Sur la figure 4.20, nous présentons le profil de vitesse expérimental obtenu par les Suisses de Davos sur les écoulements de neige dans un canal incliné [Kern et al. 2004]. La courbe est similaire à la notre.

- Profil de vitesse en aval de la rupture

Nous avons commencé par rechercher les profils équivalents (en temps depuis l'ouverture de la porte) entre la position amont et aval pour pouvoir effectuer une comparaison. Avec les images des deux caméras rapides, nous avons pu déduire le temps de parcours du front de l'écoulement entre la position à l'amont et la position à l'aval. Selon les différentes positions de mesure en aval, le temps de décalage varie entre 0,07s à 0,12s. Nous avons cherché les images décalées de ce temps de parcours pour déterminer le profil de vitesse en aval du canal.

La figure 4.21 montre les profils de vitesse à différentes positions en aval du canal. D'après les courbes, il y a une forte diminution de la vitesse par rapport à la position en amont du canal. A la position proche de la rupture de pente, les vitesses sont les plus faibles. De plus, les courbes montrent également l'épaisseur de la « zone morte » qui est d'environ 1 cm.

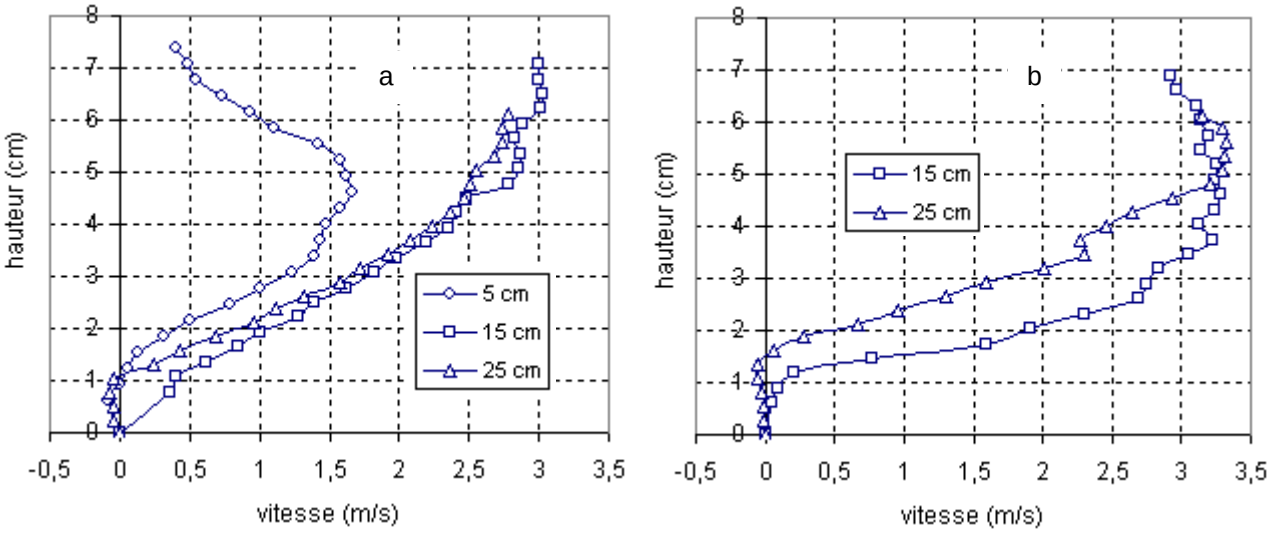


Figure 4.21 Profils de vitesse en aval du canal à différentes positions de mesure : a. à t= 2,12 s b. à t= 4,12 s par rapport au temps initial.

Ecoulements avec une ouverture initiale à 10 cm

- Profil de vitesse et profil de température granulaire en amont du canal

Pour les écoulements avec une ouverture initiale à 10 cm, qui atteignent un régime quasi permanent presque tout le temps, la vitesse ne doit pas beaucoup varier au cours de l'écoulement. Pour vérifier cela, nous avons choisi deux moments différents à t_1=3 s et t_2=5 s pour calculer les profils de vitesse. Les résultats obtenus sont montrés dans les figure 4.22 et 4.23.

Les deux profils de vitesse (figure 4.22 a et figure 4.23 a) sont similaires. La zone morte se trouve de 0 à 0,6 cm, puis la vitesse augmente rapidement jusqu'à une hauteur égale à 2 cm. Au-delà, la vitesse est quasi constante. La vitesse maximale du profil est d'environ à 3,1 m/s et la vitesse moyenne sur toute la hauteur est de 2,34 m/s à t= 3 s et 2,29 m/s à t= 5 s.

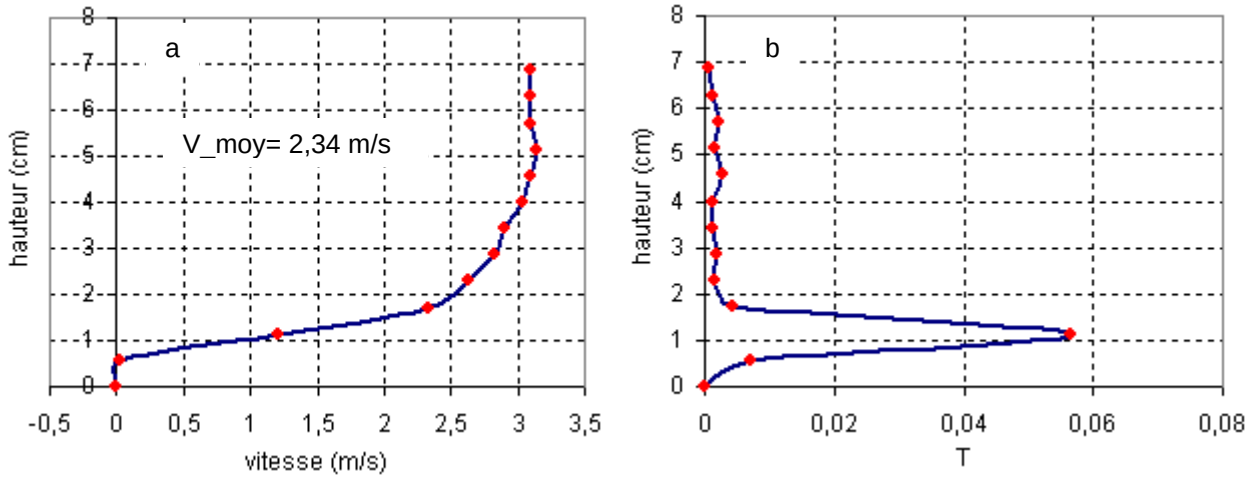


Figure 4.22 Ecoulement avec une ouverture initiale à 10 cm : a. Profil de vitesse à t= 3 s. b. Profil de température granulaire à t= 3 s.

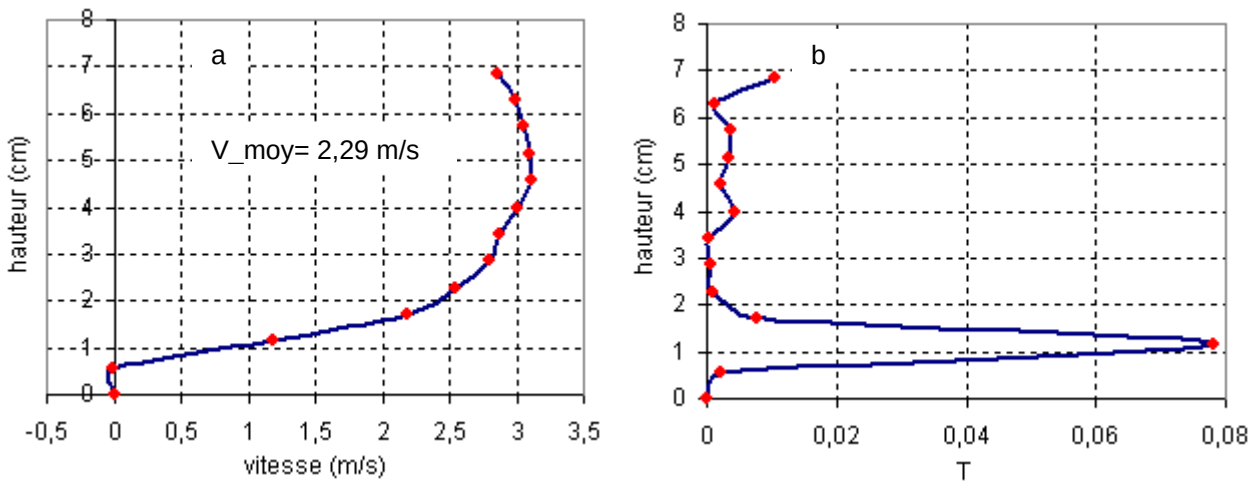


Figure 4.23 Ecoulement avec une ouverture initiale à 10 cm : a. Profil de vitesse à t= 5 s. b. Profil de température granulaire à t= 5 s.

Profil de vitesse en aval du canal

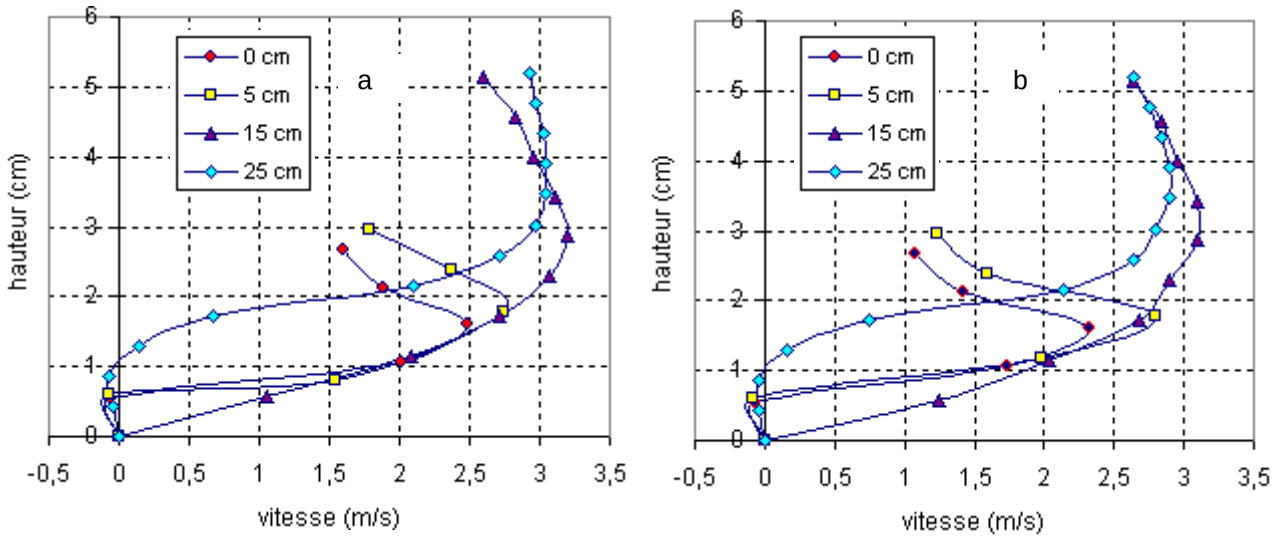


Figure 4.24 Profils de vitesse de l'écoulement avec une ouverture à 10 cm en aval du canal à différentes positions de mesure: a. A t= 3,12s b. A t= 5,12s par rapport au temps initial.

Influence de la taille de maille sur le calcul PIV des vitesses

Pour obtenir les meilleurs résultats, nous avons essayé de lancer le calcul avec différentes tailles de maille sous WIMA. La figure 4.25 montre un exemple des résultats obtenus avec différentes tailles de maille pour une même séquence d'images. Les tailles de maille sont respectivement de 32*32, 16*16, 8*8 pixels. D'après les résultats du profil de vitesse (figure 4.25 a) et du profil de température (figure 4.25 b), les courbes obtenues avec la taille de maille de 16*16 et 8*8 pixels sont quasi coïncidentes. Par contre, pour la température granulaire des différences importantes subsistent. Dans la mesure où nous utilisons la température granulaire, dont la valeur absolue en elle même ne signifie rien, uniquement pour détecter les

zones de cisaillement et les types de couche, ces décalages de valeurs ne posent pas problème. Une maille de 16x16 pixels semble largement suffisante pour notre étude.

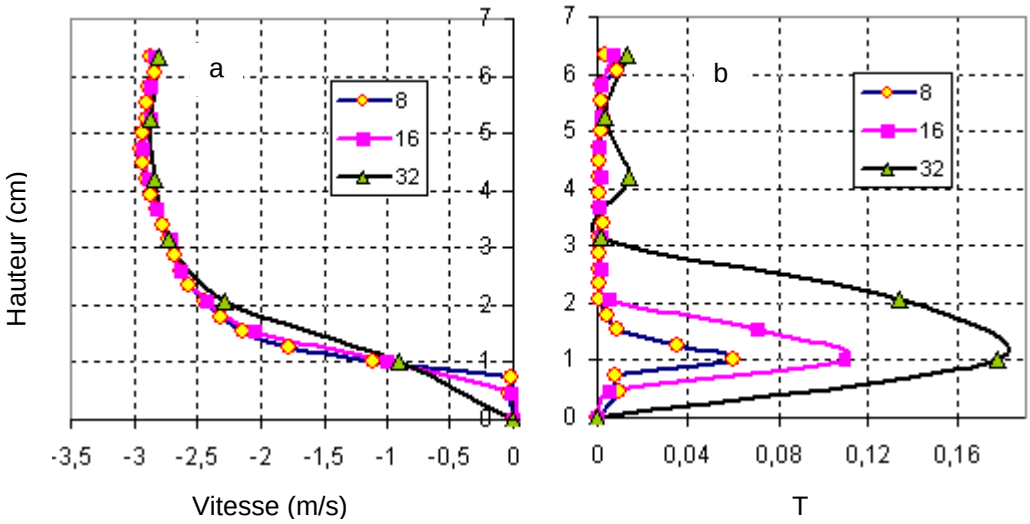


Figure 4.25 Profil de vitesse et profil de température granulaire obtenus avec différentes tailles de maille.

Synthèse

La méthode PIV nous a permis d'obtenir les profils de vitesse de l'écoulement. Les vitesses maximales sont d'environ 3~4 m/s. Pour les écoulements avec une ouverture initiale à 20 cm et à 10 cm, les vitesses ne présentent pas beaucoup de différences. Cela paraît logique, car l'inclinaison du canal est de 43° pour tous les essais, les écoulements sont tous dans un régime accéléré. Les courbes du profil de vitesse sont similaires à celle de type Bagnold. Les profils de température granulaire correspondants ont été également calculés. Avec ces profils de la température granulaire, trois couches dans l'écoulement ont été distinguées, ce qui est cohérent avec la théorie de l'énergie cinétique.

Par contre, les calculs du profil de vitesse et de température granulaire ont été basés sur des images enregistrées sur la paroi latérale où l'effet du bord est peut-être important. Les vitesses présentées précédemment sont donc certainement plus faibles que celles au milieu de l'écoulement. Avec les images enregistrées en dessus du canal à l'aide d'un faisceau laser transversal, nous avons évalué la zone où il existe un effet du bord apparent sur l'épaisseur de l'écoulement. Cette zone semble ne pas dépasser 2 cm en s'éloignant de la paroi. Mais l'influence sur les vitesses n'a pas pu être quantifiée.

4.2.2.3 Profil de densité

Pour la même raison, les profils de densité de chaque type d'écoulement ont été calculés à des moments caractéristiques comme lors des résultats présentés plus haut.

Ecoulements avec une ouverture initiale à 20 cm

- Profil de densité en amont de la rupture

Les figures 4.26 présentent les profils de densité à l'instant t= 2 et 4 s en amont de la rupture de pente pour une ouverture initiale à 20 cm. Les valeurs maximales de masse volumique calculables sont limitées à 835 kg/m^3, car la loi d'étalonnage basée sur le niveau de gris ne permet pas de déterminer la masse volumique au-delà de cette valeur (seul un niveau de gris sépare 835 et 1600 kg/ m^3…). Autrement dit, les masses volumiques maximales peuvent varier entre 835 kg/m^3 et 1600 kg/m^3. A t=2 s, dans la partie dense (entre 0 et 3,5 cm sur la hauteur), la masse volumique est très variable (voir figure 4.26 a). Cette variation traduit une perturbation de l'écoulement selon l'axe vertical. La masse volumique moyenne sur une hauteur de 8 cm est de 409 kg/m^3. A t= 4 s, la masse volumique est quasi constante dans la partie dense (de 0 à 1,9 cm), puis elle a une forte décroissance de 1,9 cm à 4 cm. Au-delà, elle est quasi nulle. La valeur moyenne sur une hauteur de 6 cm est de 357 kg/m^3.

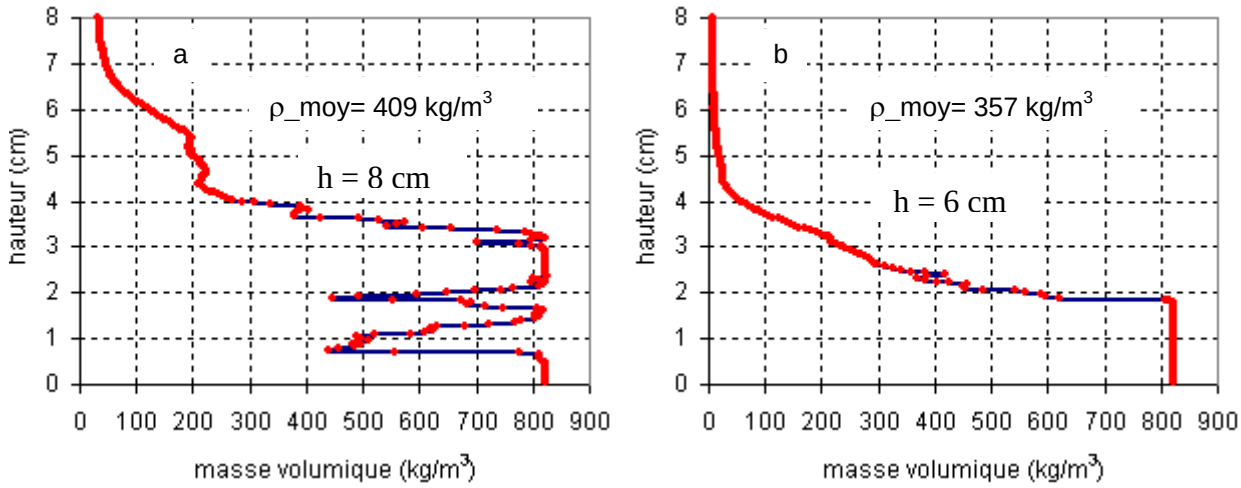


Figure 4.26 Profil de densité pour les écoulements avec une ouverture initiale à 20 cm : a. t=2s. b. t=4s.

- Profil de densité en aval de la rupture

Les profils de densité en aval de la rupture à t=2,12 s et 4,12 s pour quatre positions de mesure sont montrés en annexe 3. Nous listons dans le tableau 4.7 les valeurs moyenne de la masse volumique et d'épaisseur de l'écoulement.

t (s)	L (cm)	0	5	15	25
2,12	ρ (kg/m^3)	385	635	400	244
	h (cm)	7,5	8	8	7
4,12	ρ (kg/m^3)	446	522	443	305
	h (cm)	5,5	6	8	7,13

Tableau 4.7 Masse volumique moyenne sur la hauteur de l'écoulement en aval de la rupture.

Les graphiques donnant la masse volumique en fonction de la hauteur sont donnés en annexe III, pour des raisons de clarté du texte.

Ecoulements avec une ouverture initiale à 10 cm

- Profil de densité en amont du canal

Sur la figure 27, nous présentons le profil de densité à t= 3 s et 5 s. D'après ces courbes, nous pouvons voir que le maximum de densité de l'écoulement est contenu dans la zone morte. Parallèlement la zone fortement cisaillée entraîne une baisse notable de la densité de l'écoulement aux environs de 0,5 cm par rapport au fond du canal. La densité décroît ensuite continûment avec la hauteur de l'écoulement. Les figures montrent également qu'entre les différents temps, le profil de densité présente à peu près le même aspect, cela confirme le régime permanent.

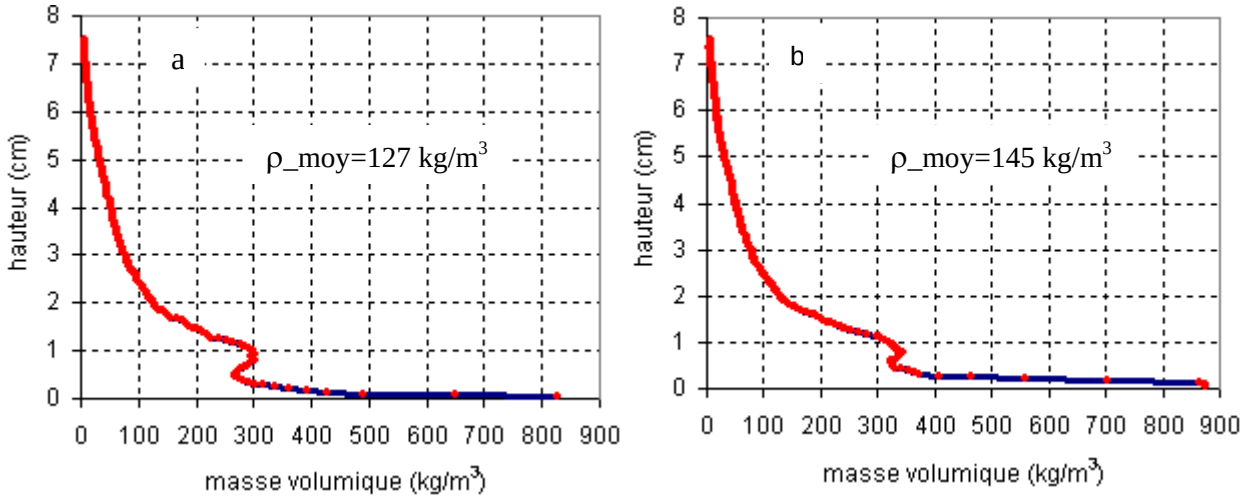


Figure 4.27 a. Profil de densité à t=3s. b. Profil de densité à t=5s.

- Profil de densité en aval du canal

Nous listons également les valeurs moyennes de la masse volumique selon la hauteur à t=3 s pour quatre positions de mesure. Les courbes sont montrées en annexe 3.

t (s)	L (cm)	0	5	15	25
3	ρ (kg/m^3)	133	157	110	193
	h (cm)	7,5	8	8	7

Tableau 4.8 Masse volumique moyennée dans la hauteur de l'écoulement en aval de la rupture.

Les graphiques donnant la masse volumique en fonction de la hauteur sont donnés en annexe III, toujours pour des raisons de clarté du texte.

Synthèse

Avec le traitement d'image et une loi d'étalonnage, nous avons obtenu les profils de densité en cours de l'écoulement, avec une précision très moyenne sur les valeurs de fortes densités. Selon les courbes, la partie basse de l'écoulement est la partie la plus dense. En comparant avec les courbes de hauteur, nous trouvons que les hauteurs mesurées avec le laser correspondent à la couche où la masse volumique est supérieure à 200 kg/m3. Bien sûr, les deux paramètres ne sont pas mesurés au même endroit (la mesure de la hauteur est au milieu

de l'écoulement et celle de la densité est sur la paroi) et l'effet du bord entraîne une augmentation locale de l'épaisseur.

4.2.3 Evolution temporelle et spatiale des sollicitations exercées par différents écoulements sur le canal inférieur

La variation temporelle des sollicitations exercées par différents types d'écoulement sur la partie instrumentée du canal inférieur a été enregistrée grâce au capteur par jauges de déformation. Leur variation spatiale a été obtenue en déplaçant le capteur le long de l'axe du canal après la rupture de pente. Nous avons donc les évolutions temporelle et spatiale des sollicitations sur la partie inférieure du canal. Les sollicitations présentées dans les paragraphes suivants sont les pressions normales et tangentielles moyennées sur la surface de plaque de 0,01m². Les valeurs des mesures ont été lissées par gommer les artéfacts de mesures dues aux chocs des particules et aux vibrations de la structure. Les pressions normales sont moyennées sur 0,03 s. Le rapport entre la pression tangentielle et la pression normale qui représente normalement le coefficient de frottement a été également étudié.

4.2.3.1 Ecoulements avec une ouverture initiale de 20 cm

Les figures 4.28 et 4.29 montrent respectivement les pressions normales et tangentielles exercées par les écoulements avec une ouverture initiale de porte de 20 cm. Sur chaque figure, les différentes courbes représentent les pressions en fonction du temps à différentes positions. La forme des courbes est similaire à celle de la hauteur en fonction du temps (voir figure 4.9). Cela signifie que sous même condition expérimentale, les sollicitations dues à l'écoulement sur la structure sont fortement liées à la hauteur de l'écoulement, donc au flux de billes. Selon les figures 4.28 et 4.29, les pressions maximales normales et tangentielles se trouvent à la rupture de pente (courbe bleu). Nous avons une valeur maximale d'environ 7 kPa pour la pression normale et une valeur de 2,2 kPa pour la pression tangentielle. Les pressions diminuent rapidement avec le décalage de la position de mesure. Pour la pression normale, à la position 5 cm, la valeur maximale ne représente que 45% de celle à la rupture de pente. A la position de 15 cm et 25 cm, les valeurs sont quasi identiques et elles diminuent jusqu'à 1 kPa, soit environ 12-15% de la valeur maximale. La diminution spatiale de la pression tangentielle est aussi remarquable mais elle reste moins importante que celle de la pression normale.

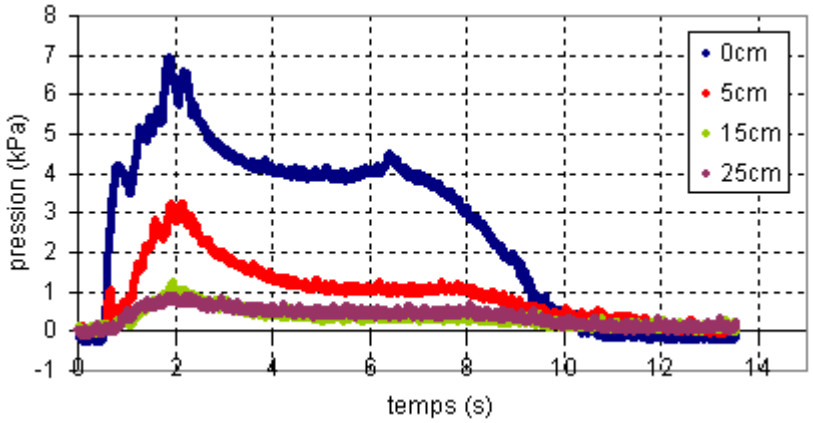


Figure 4.28 Pression tangentielle en fonction du temps aux différentes positions en aval du canal.

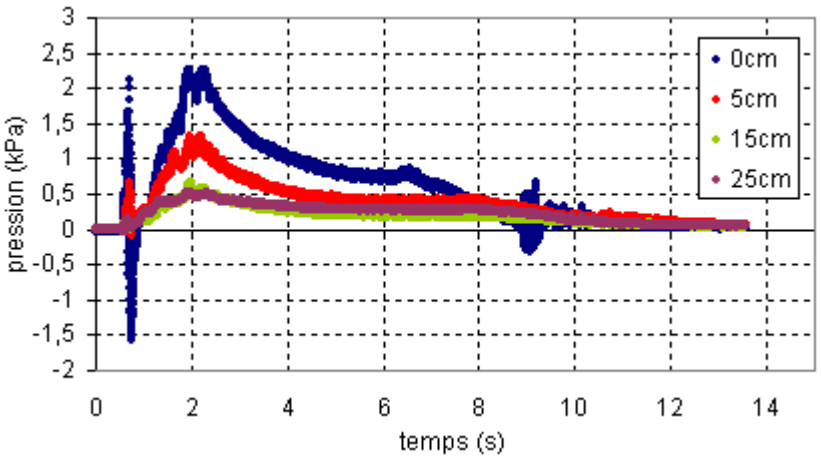


Figure 4.29 Pression tangentielle en fonction du temps aux différentes positions en aval du canal.

Nous calculons ensuite le ratio entre les pressions tangentielles et normales à chaque position donnée. D'après le critère de type de Coulomb, le ratio entre la contrainte tangentielle et normale est une relation linéaire.

$$S = \mu N$$

Nous avons tracé la pente moyenne entre pression tangentielle et pression normale tout au long de l'écoulement (voir figure 4.30). Malgré le bruit sur les mesures, il est possible de faire une analyse des moindres carrés sur les données et de prendre une approximation linéaire. Par contre, dans la zone juste après la rupture de pente où l'effet de choc est très important, les points de mesure sont très dispersés et une relation linéaire n'a pas pu être clairement identifiée. Nous remarquons que le ratio moyen augmente avec la position de mesure.

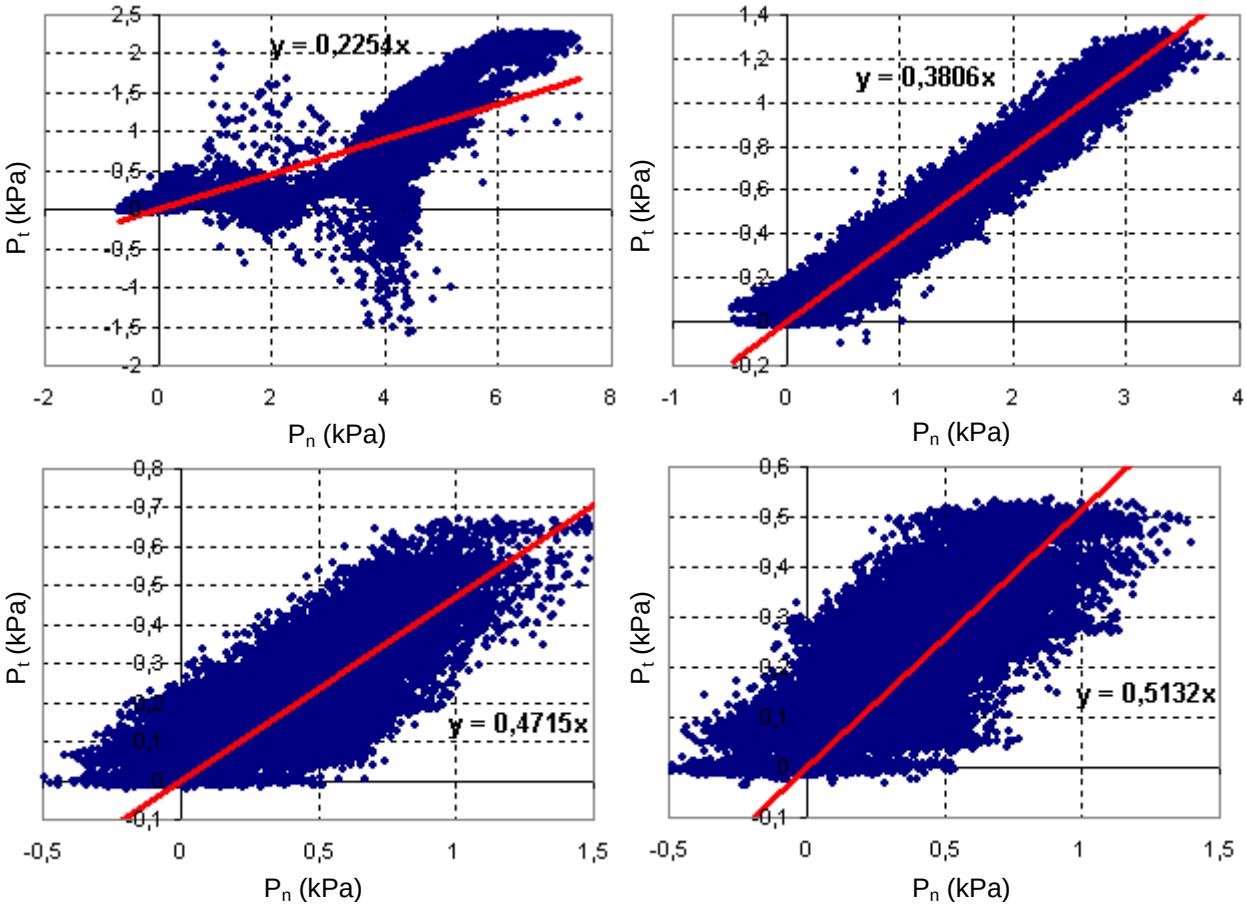


Figure 4.30 Ratio moyen pt/pn de l'écoulement : a. A la rupture de pente. b. A la position 5 cm en aval. c. La position 15 cm en aval. d. La position 25 cm en aval.

4.2.3.2 Ecoulements avec une ouverture initiale de 10 cm

Les évolutions temporelles et spatiales des pressions pour les écoulements avec une ouverture initiale de 10 cm sont présentées dans les figures 4.31 et 4.32. Le régime quasi permanent est assez étendu temporellement, la variation temporelle des pressions est négligeable dans ce domaine. La pression normale à la rupture de pente a une valeur moyenne d'environ 2,43 kPa. Les valeurs de pression sont assez faibles au-delà de la rupture, de l'ordre de 0,3-0,5 kPa. Plus les valeurs sont faibles, plus la précision de mesure est mauvaise. La pente moyenne de la pression tangentielle en fonction de la pression normale n'est plus représentative du ratio moyen. Pour calculer les ratios moyens, nous avons calculé les pressions moyennes en régime permanent, les valeurs obtenues sont données dans le tableau 4.8.

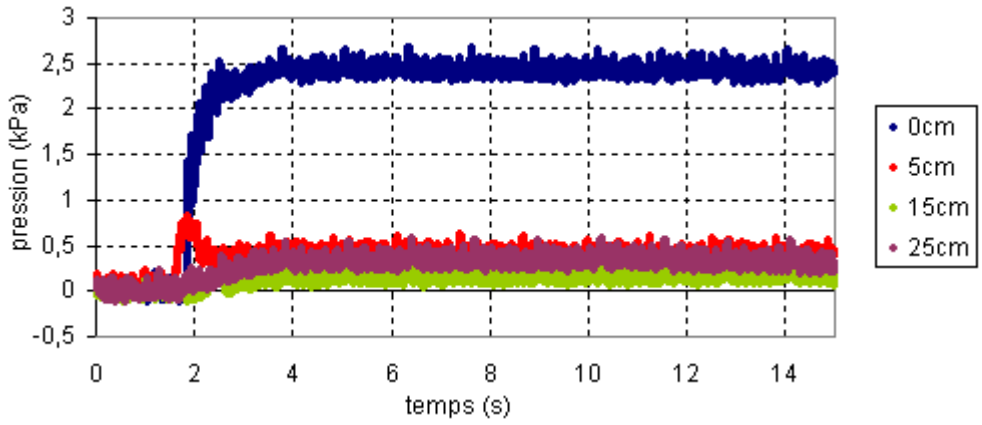


Figure 4.31 Pression normale en fonction du temps aux différentes positions en aval du canal.

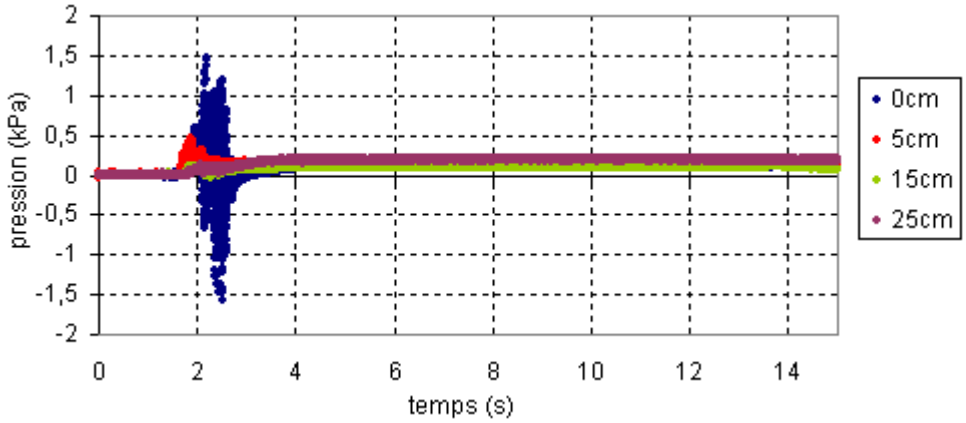


Figure 4.32 Pression tangentielle en fonction du temps aux différentes positions en aval du canal.

Position	0 (cm)	5 (cm)	15 (cm)	25 (cm)
Pt (kPa)	0,1325	0,1566	0,1098	0,1928
Pn (kPa)	2,4291	0,4234	0,1520	0,3354
Ratio	0,055	0,370	0,722	0,575

Tableau 4.9 Pressions tangentielles et normales moyennées dans le régime permanent les ratios correspondants.

D'après le tableau 4.9, le ratio entre pt et pn augmente avec la position de mesure, ce qui est similaire au cas précédent. L'évolution spatiale des ratios est principalement due à la variation de pressions normales, car la variation des pressions tangentielles n'est pas du même ordre de grandeur.

Nous comparons ensuite l'évolution spatiale du ratio moyen de trois types d'écoulement. Pour que le résultat soit plus représentatif, nous avons utilisé un paramètre caractéristique appelé la position du capteur relative x'. C'est un paramètre adimensionné définie par x/h. x étant la position réelle du capteur par rapport à la rupture de pente, h la hauteur caractéristique de l'écoulement avant la rupture de pente. D'après les travaux de [Platzer 2006] sur l'avalanche de neige en canal, quand $x' > 5$, l'effet de choc dû au changement de pente peut être négligé, les pressions exercées par l'écoulement sont proches que celles hydrostatiques. Le ratio entre la pression tangentielle et la pression normale est égal à $\tan(\phi)$. Pour nos trois types

d'écoulement granulaire, nous avons pris les valeurs de la hauteur caractéristique de 3 cm pour les essais à 15 et 20 cm d'ouverture, et de 1,6 cm pour les essais à 10 cm d'ouverture. Les résultats obtenus sont montrés dans la figure 4.33. Sur la courbe, nous trouvons qu'à partir de $x' = 5$, pour tous les types d'essai, les valeurs du ratio restent d'environ 0,5. Ces valeurs sont proches du coefficient de frottement interne du matériau qui est égale à 0,55. Cela correspond aux études de Platzer.

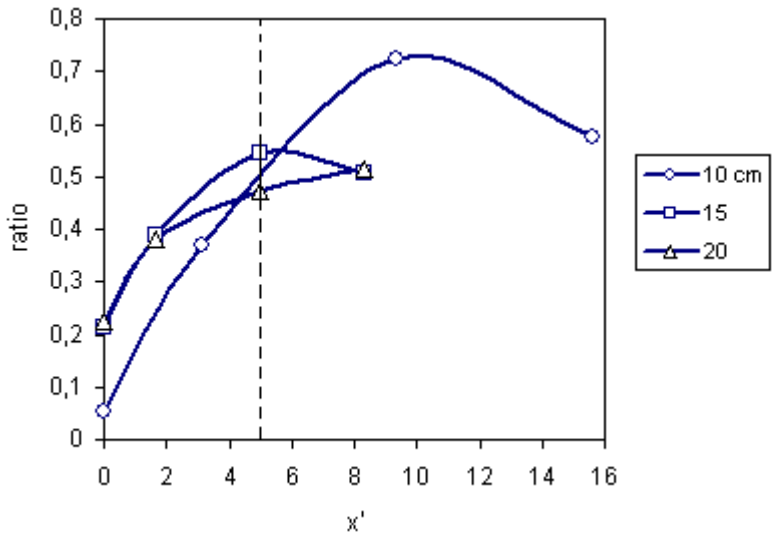


Figure 4.33 Ratio moyen entre la pression tangentielle et normale à chaque position de mesure pour trois types d'écoulement.

4.2.4 Vérification de la méthode de calcul des pressions

4.2.4.1 Méthode générale

La vérification de la méthode de calcul des pressions d'impact de l'avalanche de neige sur la plaque capteur a été présentée dans le paragraphe précédent. Nous utilisons ici la même méthode pour calculer les pressions d'impact de l'écoulement granulaire sur le canal inférieur. Les mesures expérimentales des caractéristiques de l'écoulement ont été utilisées. Nous listons d'abord dans le tableau 4.10 les caractéristiques d'écoulement en amont du canal. Pour les écoulements avec une ouverture initiale à 20 cm, nous avons pris les valeurs de caractéristiques d'écoulement au temps égal à 2 s et 4 s. Pour les écoulements avec une ouverture initiale à 10 cm, nous avons pris celles au temps égal à 3 s et 5 s. ρ et V sont la masse volumique et la vitesse moyennées selon l'épaisseur h. h est définie comme l'épaisseur de l'écoulement et correspond à une masse volumique à partir d'une valeur de 20 kg/m^3 (limite basse définie empiriquement).

Ecoulement	t (s)	ρ (kg/m3)	V (m/s)	h (cm)	β (°)
Ouverture à 20 cm	2	409	3,64	6	28
	4	270	2,52	6	28
Ouverture à 10 cm	3	127	2,34	6	28
	5	145	2,29	6	28

Tableau 4.10 Valeurs moyennes des caractéristiques pour les écoulements avec une ouverture initiale à 20 et 10 cm en amont du canal.

Les pressions calculées et mesurées sont montrées dans le tableau 4.11. La comparaison entre ces deux valeurs montre que les pressions calculées sont très inférieures à celles mesurées.

Ouverture	t (s)	L (cm)	X' (-)	Pn_cal (Pa)	Pn_mes (Pa)	Pt_cal (Pa)	Pt_mes (Pa)	Pn_cal /Pn_mes	Pt /Pt_mes
20 cm	2	10	0	2034	7000	814	2200	0,291	0,370
		15	1,67	1356	3000	542	1400	0,452	0,387
		25	5	813	1000	325	600	0,813	0,542
		35	8,33	581	900	232	500	0,646	0,464
	4	10	0	483	4000	193	1000	0,121	0,193
		15	1,67	322	1300	129	500	0,248	0,258
		25	5	193	400	77	300	0,483	0,257
		35	8,33	140	500	55	400	0,276	0,138
10 cm	3	10	0	196	2429	78	133	0,081	0,586
		15	3,13	130	423	52	157	0,309	0,331
		25	9,38	78	152	31	110	0,515	0,285
		35	15,63	56	335	22	193	0,167	0,114
	5	10	0	214	2429	86	133	0,088	0,647
		15	3,13	143	423	57	157	0,337	0,363
		25	9,38	86	152	34	110	0,563	0,309
		35	15,63	61	335	24	193	0,183	0,124

Tableau 4.11 Comparaison des pressions calculées et mesurées pour les écoulements avec une ouverture à 20 cm et à 10 cm.

4.2.4.2 Méthode ajustée

Les travaux de [Platzer 2006] ont proposé une formule ajustée pour calculer la pression normale due à l'impact. La formule s'écrit comme suit :

$$p_n = \frac{\rho_0 h_0 v^2 \sin(\beta)}{L} + \rho g h$$

Le terme supplémentaire $\rho g h$ représente la pression normale hydrostatique sur la structure, ici la plaque de capteur. Nous avons donc pris la masse volumique moyenne selon l'épaisseur sur toute la largeur de la plaque capteur. Les résultats correspondants sont montrés dans le tableau 4.12.

Ouverture	t (s)	L (cm)	X' (-)	Pn_cal (Pa)	ρgh (Pa)	Pn_total (Pa)	Pt_cal (Pa)	Pn_total /Pn_mes	Pt /Pt_mes
20 cm	2	10	0	2034	283	2317	927	0,331	0,424
		15	1,67	1356	498	1854	742	0,618	0,530
		25	5	813	314	1127	451	1,128	0,752
		35	8,33	581	168	749	300	0,832	0,599
	4	10	0	483	241	724	289	0,181	0,289
		15	1,67	322	307	629	252	0,484	0,503
		25	5	193	347	540	216	1,352	0,721
		35	8,33	140	213	353	141	0,703	0,351
10 cm	3	10	0	196	114	310	124	0,128	0,931
		15	3,13	130	202	332	133	0,785	0,846
		25	9,38	78	215	293	117	1,932	1,068
		35	15,63	56	341	397	159	1,184	0,822
	5	10	0	214	122	336	134	0,139	1,012
		15	3,13	143	210	353	141	0,834	0,898
		25	9,38	86	231	317	127	2.08	1,15
		35	15,63	61	315	376	150	1.123	0.779

Tableau 4.12 Comparaison des pressions calculées et mesurées avec la méthode ajustée.

La comparaison entre les valeurs calculées et mesurées est également montrée dans les figures 4.34 et 4.35. Le 'ratio' est le rapport entre les pressions calculées et les pressions mesurées. Pour chaque type d'écoulement, les pressions calculées avec la méthode 2 sont plus importante que celles calculées avec la méthode 1, et elles sont plus proches les valeurs expérimentales.

Pour l'écoulement avec une ouverture initiale de 20 cm (voir figure 4.34 a et b), à part la pression normale à la distance x' = 5, les pressions calculées sont moins importantes que les valeurs mesurées. Les ratios augmentent selon la distance x'. A la distance x' égale à 0, le ratio a une valeur minimale d'environ à 0,2 (0,33 à t = 4 s) pour la pression normale et 0,4 (0,3 à t = 4 s) pour la pression tangentielle. Dans la zone où l'effet d'impact est très important, les pressions calculées avec la méthode actuelle sont très inférieures aux valeurs réelles. La méthode n'est donc pas adaptée pour décrire le phénomène d'impact. A x' = 5, le ratio pour la pression normale est supérieur à 1, celui pour la pression tangentielle atteint aussi sa valeur maximale environ à 0,75. Par contre, à x'=8,33, les ratios rebaissent.

Pour l'écoulement avec une ouverture initiale à 10 cm (voir figure 4.35 a et b), la deuxième méthode donne des résultats assez satisfaisants. Les pressions tangentielles calculées sont quasi équivalentes aux valeurs mesurées à chaque position donnée. Par contre, pour la pression normale, à la distance x'= 0, le ratio a toujours une valeur très basse (0,13). Il augmente rapidement selon la distance, et à x'= 9,38, le ratio atteint 2. Nous n'avons pas eu les valeurs à x'=5, mais par extrapolation, nous pouvons déduire que le ratio à x'=5 est supérieur à 1. La méthode de calcul ajustée peut donc prédire correctement des pressions d'impact à partir d'une certaine distance après le changement de pente. La proposition des suisses sur cette distance caractéristique (x'=5) est justifiée et raisonnable.

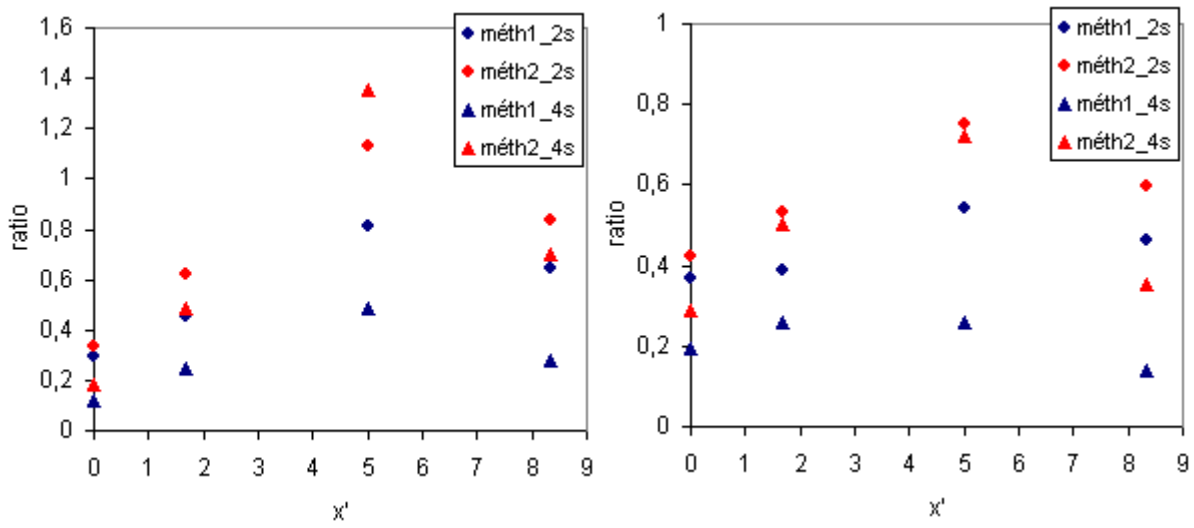


Figure 4.34 Comparaison des pressions calculées et mesurées pour les écoulements avec une ouverture à 20 cm au temps t=2 s et t= 4 s : a. Pression normale b. Pression tangentielle.

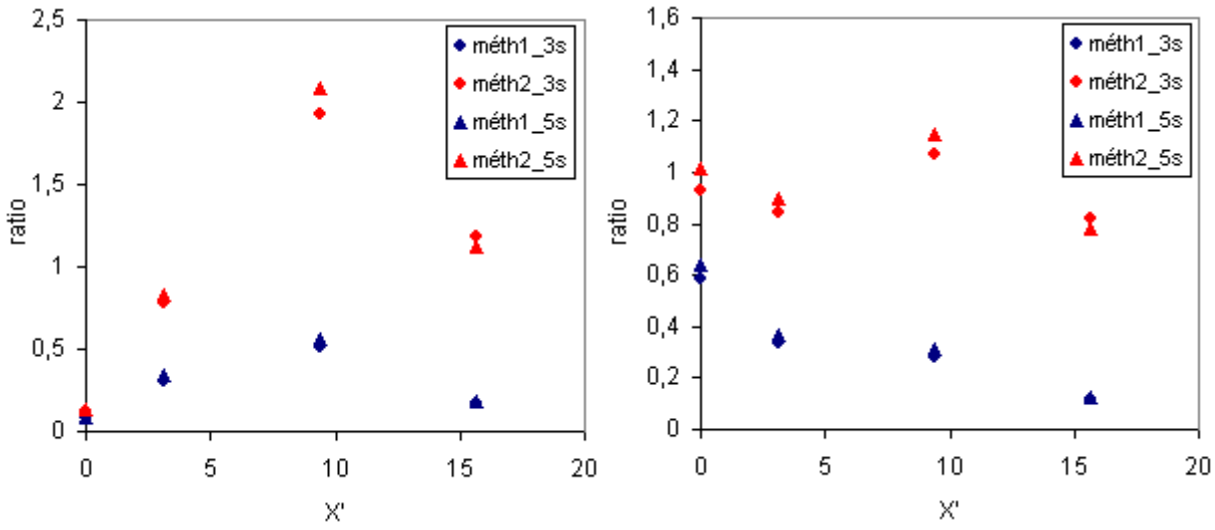


Figure 4.35 Comparaison des pressions calculées et mesurées pour les écoulements avec une ouverture à 10 cm au temps t=3 s et t= 5 s: a. Pression normale b. Pression tangentielle.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux sur les écoulements en canal. Les caractéristiques de l'écoulement dont l'épaisseur, la vitesse et la densité en amont et en aval du changement de pente ont été d'abord présentées. Du fait d'avoir rencontré un artefact d'expérimentation (pics de hauteur au milieu de l'écoulement) pour les écoulements avec une ouverture initiale à 15 cm, les exploitations des résultats de ce type d'écoulement n'ont pas été poursuivies. Les exploitations et analyses des résultats sont concentrées sur les écoulements avec une ouverture initiale à 20 cm et 10 cm.

Pour l'épaisseur de l'écoulement, la méthode ave le faisceau laser nous a permis d'obtenir la hauteur en fonction du temps tout le long d'écoulement et afin de constater les différents comportements d'écoulement. Pour les écoulements avec une ouverture initiale à 20 cm, nous avons les pics de hauteur au début de l'écoulement, puis une courte durée de régime quasi

permanent de l'ordre de 2 s. Pour les écoulements avec une ouverture initiale à 10 cm, les hauteurs sont quasi constantes pendant toute la durée de l'essai. Par contre, la méthode ne permet que de mesurer la hauteur dans la partie dense de l'écoulement, celle de la partie de la couche de saltation n'a pas pu être déterminée.

Pour le profil de vitesse, les courbes obtenues avec la méthode PIV sont similaires à celles mesurées sur les écoulements de neige en canal et au modèle de Bagnold. Avec le calcul du profil de température, les trois couches distinguées par l'énergie cinétique dont la couche de base glissante, la couche fluidisée et la couche grossière ont été constatées. La vitesse en aval subit une forte diminution juste après le changement de pente, elle augmente à nouveau ensuite à cause du rebondissement de l'écoulement.

Pour le profil de densité, la méthode basée sur le traitement d'image avec une loi d'étalonnage nous a permis d'obtenir la densité au cours de l'écoulement. Comme nous l'avons vu, et de par son expression, la loi est très précise à basse densité mais très abrupte à haute densité. Nous ne sommes donc pas capables d'exprimer correctement les hautes valeurs issues d'image dont la blancheur est proche des images de billes au repos.

Les mesures des efforts avec le capteur à jauges à quatre positions après le changement de pente nous ont permis d'obtenir les sollicitations d'impact et leurs variations spatio-temporelles. Les résultats montrent que les sollicitations d'impact juste après le changement de pente sont entre 5 et 8 fois plus élevées que celles mesurées à la position plus éloignée. La variation spatiale des sollicitations est donc très importante.

Enfin, nous avons appliqué deux méthodes de calcul des pressions dû à l'écoulement sur la structure en utilisant les résultats expérimentaux des caractéristiques de l'écoulement. La comparaison entre les pressions calculées et mesurées montre que la méthode ajustée proposée par [Plazter 2006] donne les meilleurs résultats. Par contre, pour les pressions dans la position juste après le changement de pente, ces deux méthodes donnent les valeurs beaucoup plus faibles que les résultats expérimentaux.

Chapitre 5. Modélisation d’une structure de galerie paravalanche.

5.1 Introduction

Le chapitre 4 nous a permis de caractériser les sollicitations d'une avalanche de neige sur une structure de type galerie. Grâce aux différentes expérimentations, nous avons pu déterminer les évolutions spatio-temporelles par ce type de chargement afin de pouvoir les appliquer à des structures réelles. Dans ce chapitre, trois objectifs nous paraissent importants à atteindre. Le premier concerne l'influence d'une sollicitation dynamique comme chargement d'une galerie. Pour cela, nous avons utilisé les sollicitations obtenues au Lautaret et qui dépendent essentiellement de la topographie du site (pente, volume du couloir, exposition etc..). Ces valeurs ne représentent pas un cas général mais le comportement et la forme des sollicitations peuvent être représentatifs de ce type d'impact. Par conséquent, nous avons gardé, dans un premier temps, les sollicitations du Lautaret pour le calcul sur une structure plus générale. Le deuxième objectif est de déterminer les sollicitations pour qui conduisent à un endommagement non négligeable de la structure. Le dernier objectif est basé sur la comparaison entre sollicitations dynamiques et statiques. En utilisant les mêmes chargements que pour les calculs dynamiques, les calculs statiques permettraient d'identifier l'effet dynamique sur la structure. Pour faire ces études, nous avons modélisé une structure simplifiée en béton armé de la galerie de Montaulever. Les études numériques ont été conduites avec le logiciel Fedeaslab à partir d'un élément poutre multifibre de type Timoshenko la loi d'endommagement de La Borderie pour le béton et le modèle Menegotto-Pinto pour l'acier.

5.2 Principes de la simulation

Dans les paragraphes suivants, nous allons présenter le logiciel Fedeaslab, la théorie d'un élément poutre multifibre de type Timoshenko et les lois de comportement de La Borderie et de Menegotto-Pinto.

5.2.1 Outil de simulation Fedeaslab

Fedeaslab est une toolbox éléments finis de Matlab qui permet de simuler les réponses linéaires ou non linéaires des structures sous chargements statiques ou dynamiques. La toolbox consiste en plusieurs fonctions regroupées dans différents répertoires (voir figure 5.1). La structure de programmation de Fedeaslab est simple et par conséquent, le développement du logiciel pour des utilisateurs est facile. Depuis son premier développement en 1998 à l'université de Californie, Fedeaslab devient actuellement un outil puissant dans le domaine de recherche pour l'analyse non linéaire de structures.

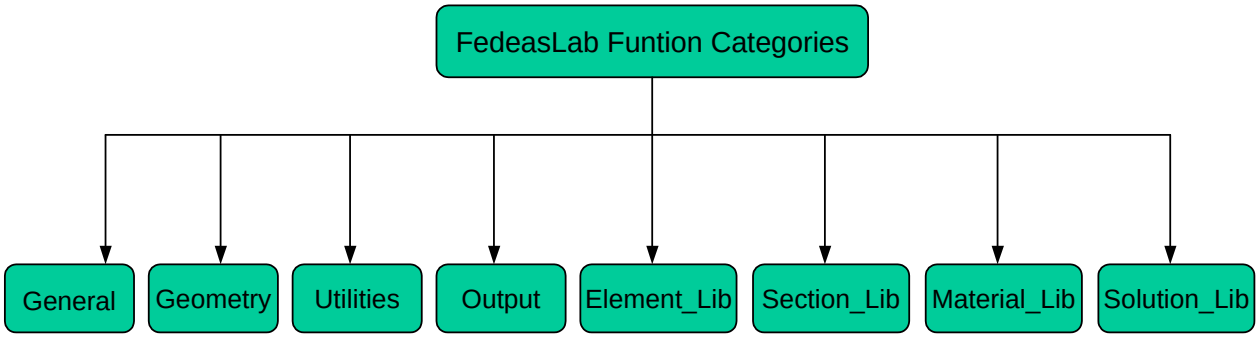


Figure 5.1 Structure du fonctionnement de Fedeaslab.

5.2.2 Elément poutre multifibre de type Timoshenko

Un élément poutre multifibre est un élément fini basé sur la théorie des poutres dont chaque section est divisée en fibres [X.H Nguyen 2006]. A chaque fibre nous pouvons associer une loi de comportement locale en contraintes – déformations. Il est donc possible de modéliser plusieurs matériaux différents, la section d'élément pouvant être quelconque (hétérogène et non-symétrique). La figure 5.2 décrit le principe de la modélisation d'un élément poutre multifibre en béton armé.

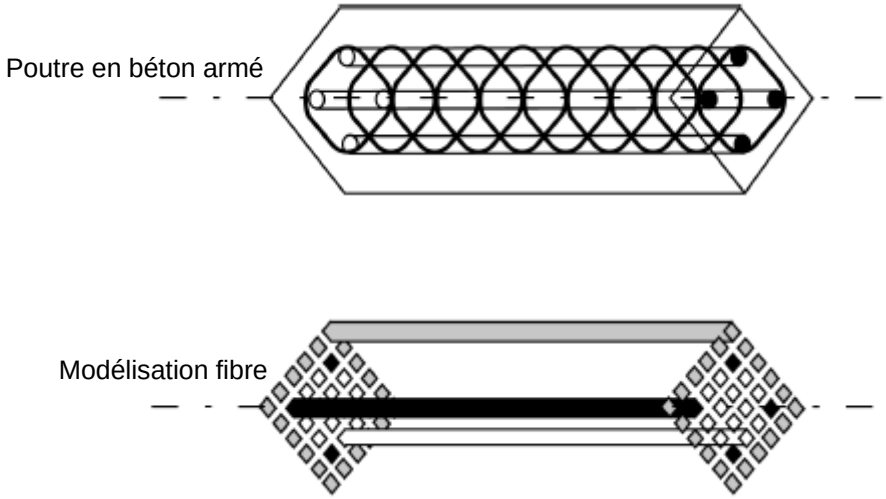


Figure 5.2 Description d'une modélisation d'un élément poutre multifibre.

Les formulations d'éléments finis poutre multifibre de type Timoshenko sont détaillées en annexe IV.

5.2.3 Comportement du béton (Modèle de La Borderie)

Le comportement du béton simulé est basé sur le modèle de La Borderie [La Borderie 1991]. C'est un modèle d'endommagement du béton qui permet de simuler les réponses axiales du béton sous chargements cycliques. Le modèle comprend deux variables, l'endommagement en traction (D_1) et l'endommagement en compression (D_2). Le phénomène unilatéral et le recouvrement de raideur sont également pris en compte. Les déformations inélastiques sont incluses dans un tenseur isotropique. La déformation totale peut être définie comme suit :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{in} \tag{5.1}$$

$$\varepsilon^e = \frac{\langle \sigma \rangle_+}{E(1-D_1)} + \frac{\langle \sigma \rangle_-}{E(1-D_2)} + \frac{\nu}{E}\left(\sigma - Tr(\sigma) I\right) \tag{5.2}$$

$$\varepsilon^{in} = \frac{\beta_1 D_1}{E(1-D_1)} \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} + \frac{\beta_2 D_2}{E(1-D_2)} I \tag{5.3}$$

où

$$Tr(\sigma) \in [0,+\infty) \rightarrow \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} = I \tag{5.4}$$

$$Tr(\sigma) \in [-\sigma_f, 0) \rightarrow \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} = \left(1 - \frac{Tr(\sigma)}{\sigma_f}\right) I \tag{5.5}$$

$$Tr(\sigma) \in (-\infty, -\sigma_f) \rightarrow \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} = 0.I \tag{5.6}$$

avec ε^e déformation élastique, ε^{in} déformation inélastique et σ la tenseur des contraintes. I représente le tenseur unitaire, $Tr(\sigma) = \sigma_{ij}$ est la fonction de fermeture de fissure et σ_f est la contrainte pour la fermeture de fissure. $\langle \cdot \rangle_+$ et $\langle \cdot \rangle_-$ correspondent respectivement aux parties positives et négatives du tenseur des contraintes. E est le module d'Young initial, ν le coefficient de poisson. D_1 *et* D_2 sont les variables d'endommagement en traction et en compression. β_1 et β_2 sont des constantes du matériau. Les critères d'endommagement sont décrits par :

$$f_i = Y_i - Z_i \tag{5.7}$$

i =1 pour le cas en traction et i=2 pour le cas en compression. Z_i est un seuil qui dépend de la variation du durcissement. Y_i est la force associée à la variable Z_i. La loi d'évolution des variables d'endommagement s'écrit :

$$D_i = 1 - \frac{1}{1 + \left[A_i \left(Y_i - Y_{0i}\right)\right]^{B_i}} \tag{5.8}$$

où Y_{0i} est le seuil élastique initial ($Y_{0i} = Z_i\,(D_i = 0)$), A_i et B_i sont des constantes du matériau. La figure 5.3 montre les réponses uniaxiales dans un diagramme contraintes-déformations du modèle d'endommagement du béton sous chargements cycliques.

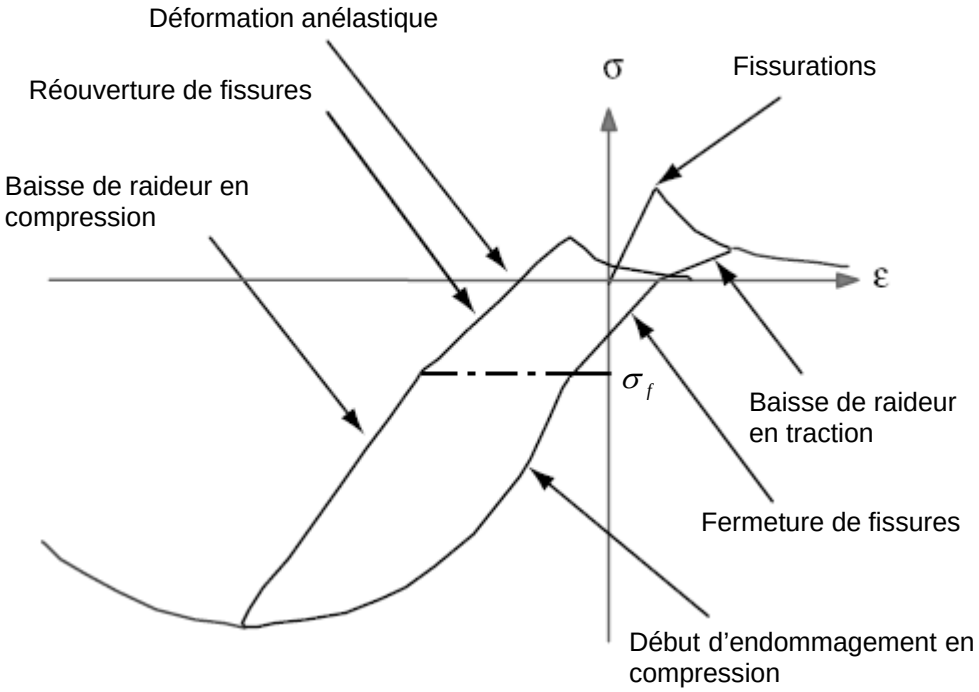


Figure 5.3 Réponses uniaxiales de contraintes-déformations du modèle d'endommagement du béton sous chargements cycliques.

Dans le modèle de La Borderie [La Borderie, 1991], les valeurs de paramètres sont données dans le tableau 5.1 :

E (GPa)	Y_{01} (Pa)	Y_{02} (Pa)	A_1 (MPa^{-1})	A_2 (MPa^{-1})	B_1	B_2	β_1 (MPa)	β_2 (MPa)	σf (MPa)
33,50	335	1,5e+04	4e+03	7,00	1,2	1,5	1,0	- 40	3,5

Tableau 5.1 Valeurs de paramètres du modèle de La Borderie [La Borderie 1991].

5.2.4 Comportement de l'acier (Modèle Menegotto-Pinto)

Le comportement des armatures a été modélisé par le modèle Menegotto-Pinto avec écrouissage isotrope. Ce modèle permet de simuler le comportement élasto-plastique uniaxial des armatures sous chargement cyclique [Menegotto et al. 1973]. Il prend en compte l'écrouissage et l'effet Bauschinger des barres. Après les travaux de [Monti et al.1992], le phénomène de flambement a été pris en compte dans le modèle de façon phénoménologique.

Le modèle est basé sur deux parties : le chargement monotone et le chargement cyclique. La figure 5.4 donne la relation entre la contrainte et la déformation de l'acier en traction monotone. Les réponses sont décrites en trois parties successives : élasticité linéaire, palier plastique et écrouissage. Dans le cas d'un déchargement, la réponse dépend du point de démarrage de celui-ci. Si le déchargement commence dans la zone d'élasticité linéaire, la déformation reste élastique. Par contre, quand le déchargement se situe dans la zone plastique,

nous aurons une relation de Giuffré (courbe de Giuffré) : la déformation passe d'abord l'état élastique, puis à partir d'une certaine valeur, la décharge devient non linéaire.

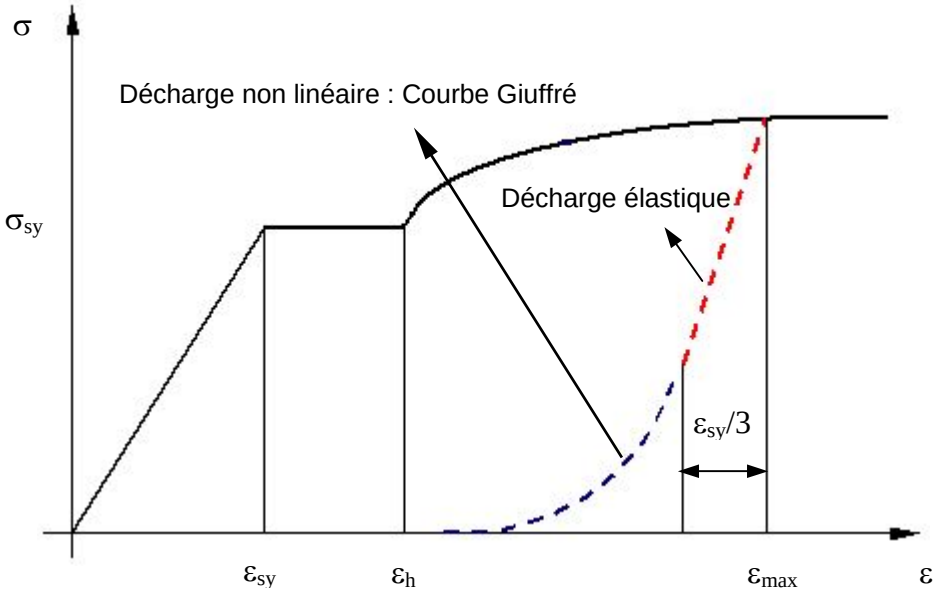


Figure 5.4 Courbe de Giuffré.

La courbe de Giuffré peut être utilisée quand :

$$\left|\varepsilon_{\max} - \varepsilon\right| > \frac{\varepsilon_{sy}}{3} \tag{5.9}$$

où $\varepsilon_{\max}$ est la déformation maximale atteinte en charge.

En cas de chargement cyclique, le comportement entre deux points inverses (demi-cyclique) peut être décrit par une courbe analytique dont l'expression est la suivante :

$$\sigma^* = b\varepsilon^* + \left(\frac{(1-b)}{\left(1+\left(\varepsilon^*\right)^R\right)^{1/R}} \right) \varepsilon^* \tag{5.10}$$

avec $$\sigma^* = \frac{\sigma_s - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r} \; ; \; \varepsilon^* = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r} \; ; \; R = R_0 - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi}$$

La formule 5.10 décrit des courbes situées entre deux asymptotes de pentes E_0 et E_h qui ont un point commun (σ_0, ε_0). Le point (σ_r, ε_r) correspond aux coordonnées au dernier point où il y a un changement du sens du chargement, et le point (σ_s, ε_s) correspond au point étudié. b est le rapport entre la pente d'écrouissage et la pente d'élasticité ($b = E_h / E_0$). R est un paramètre qui permet de définir la forme de la transition de la courbe. Cette branche de la courbe traduit l'effet Bauschinger. Le paramètre ξ est la différence entre la déformation maximale atteinte au cours de chargement et ε_0, défini par $\xi = \varepsilon_0 - \varepsilon_r$. Le module E_h est défini par $E_h = \dfrac{\sigma_{su} - \sigma_{sy}}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sy}}$, avec ($\sigma_{su}$, ε_{su}) est le point qui fait correspondre la contrainte et la

déformation ultimes. Le point (σ_{sy}, ε_{sy}) signifie le début de la plastification (à la fin du palier).

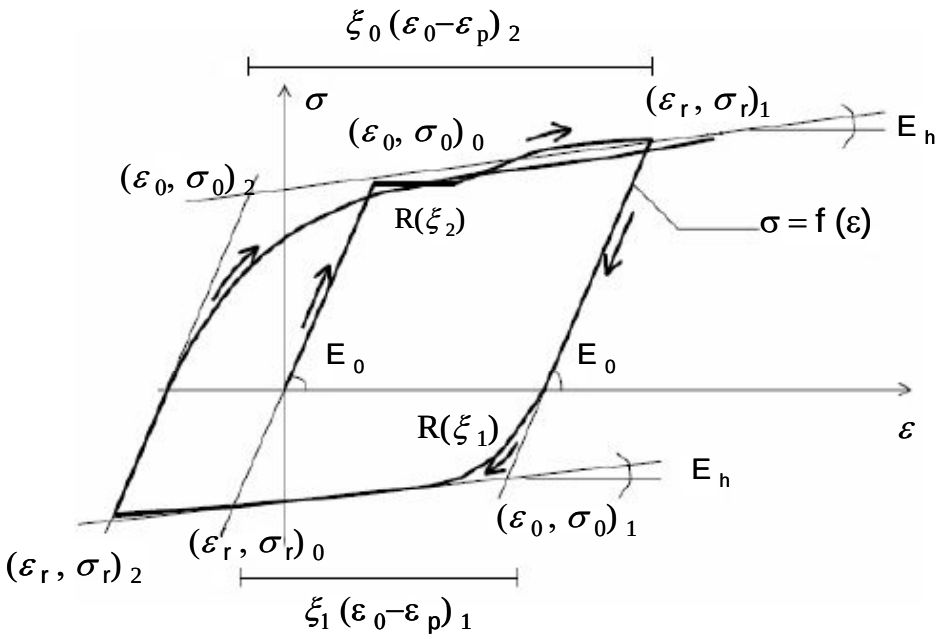


Figure 5.5 Comportement sous chargement cyclique [Guedes et al.1994].

Les paramètres R_0, a_1 et a_2 sont des constantes sans unités qui dépendent des propriétés mécaniques de l'acier. Les travaux expérimentaux de [Menegotto et al. 1973] ont proposé de prendre R_0 = 20,0, a_1 = 18,5, a_2 = 0,15.

Dans le modèle amélioré de [Monti et al.1992], le flambement a été pris en compte. Pour un rapport L/D $\leq$ 5, la courbe de compression est considérée identique à celle en traction. Ici, L et D sont respectivement la longueur et le diamètre de la barre d'acier. Lorsque L/D > 5, le flambement fait son apparition. En cas de compression, la réponse dans la zone élastique a un comportement adoucissant. Le rapport entre la pente d'écrouissage et la pente d'élasticité est défini par :

$$b_c = a\left(5 - L/D\right)e^{\left(b\xi'\frac{E}{\sigma_y^0 - \sigma^\infty}\right)} \tag{5.11}$$

ξ' est la différence maximale entre les déformations dans les deux directions de chargement. $\sigma_\infty = 4.0\dfrac{\sigma_{sy}}{L/D}$. Une contrainte σ_s^* est ajoutée pour faciliter le positionnement de la courbe par rapport à l'asymptote, elle est définie par :

$$\sigma_s^* = \gamma_s b E_0 \frac{b - b_c}{1 - b_c} \tag{5.12}$$

avec

$$\gamma_s = \frac{11.0 - L/D}{10\left(e^{c^* L/D} - 1.0\right)} \tag{5.13}$$

Après un demi-cycle en traction suivant, le module d'Young réduit est défini par :

$$E_r = E_0\left(a_5 + \left(1.0 - a_5\right)e^{\left(-a_6\xi_p^2\right)}\right) \tag{5.14}$$

avec $a_5 = 1.0 + \left(5.0 - L/D\right)/7.5$ et $\xi_p = \xi\left(\varepsilon_0 - \varepsilon_r\right)$. Les autres paramètres a, c et a_6 sont des constantes sans unités qui dépendent de propriétés des aciers. D'après les résultats expérimentaux de [Monti et al.1992], a=0,006 ; c=0,5 et a_6=620,0.

5.2.5 Propriétés des matériaux utilisés

Les propriétés de matériaux utilisées sont listées dans les tableaux suivants :

Tableau 5.2.a Propriété de l'acier

E_0 (GPa)	F_y (MPa)	b (E_{sh} / E_0)	a_1	a_3
200	460	((710e6-460e6)/(0.11-0.0023))/200e9	55	55

Tableau 5.2.b Propriété du béton

E (GPa)	υ	Y_{01} (Pa)	Y_{02} (Pa)	A_1 (MPa^{-1})	A_2 (MPa^{-1})	B_1	B_2	β_1 (MPa)	β_2 (MPa)	σf (MPa)
24,49	0,2	380	9e+04	600	5	1,0	1,6	1,0	-40	3,5

Tableau 5.2 Propriétés des matériaux.

5.3 Modélisation de la structure sous différents chargements

5.3.1 Modèle de la modélisation utilisé pour le calcul EF

5.3.1.1 Géométrie

La structure modélisée est déduite d'une analyse dimensionnelle de la galerie paravalanche de Montaulever située entre les Ménuires et Val-Thorens. L'ouvrage se décompose en deux tronçons d'une longueur totale de 489 m. Le premier tronçon, à l'amont, est long de 232 m, le second de 257 m. Chaque tronçon est constitué de plusieurs tranches et chaque tranche consiste en plusieurs travées identiques (voir le plan en annexe V). Chaque travée est composée de deux poteaux en amont, deux poteaux avals, une dalle, deux poutres longitudinales et deux entre-toises transversales (voir la figure 5.6). La dalle est posée sur deux entretoises, les entretoises sont supportées par des poutres longitudinales. Les poutres longitudinales sont supportées par les poteaux en amont et en aval. La travée mesure 6 mètres de long et 8 mètres de large (distance nette entre les poteaux).

Dans notre modèle, nous avons souhaité faire une modélisation en 2D simple afin de pouvoir introduire un niveau de chargement complexe (variation dans le temps dans l'espace). Pour cette raison, nous avons homogénéisé tous les éléments dans la travée et simplifié l'ensemble de la structure à une poutre-dalle. De plus, pour simplifier le calcul, nous avons pris un mètre de large de la structure en supposant la déformation plane sur les deux cotés suivant la largeur. Le même type de résultat peut être attendu sur une structure plus complexe comme

celle du Montaulever. Selon les plans, nous avons défini la longueur de la poutre-dalle comme étant de 14,4 m. Pour l'épaisseur, la partie structurelle de la dalle mesure 25 cm. Pour prendre en compte l'effet des poutres, nous avons pris une épaisseur plus élevée de 35 cm.

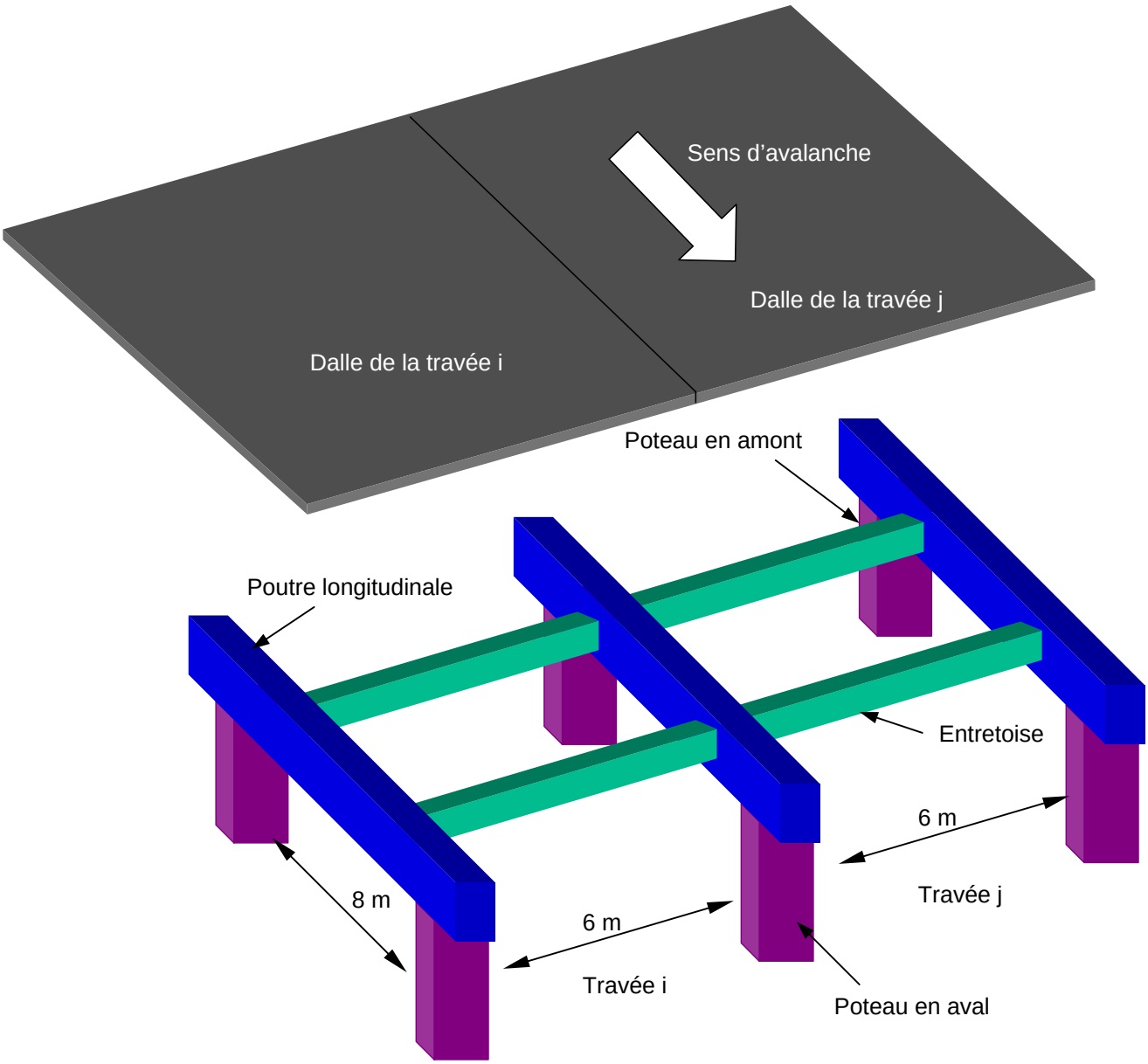


Figure 5.6 Schéma simplifié de l'ensemble de la structure.

5.3.1.2 Conditions aux limites

Le système de liaison en amont entre le poteau et la poutre est réalisé par des blocages des déplacements verticaux et horizontaux. La condition aux limites en amont peut être simplifiée comme une rotule. Quant à l'aval, la poutre est simplement appuyée sur le poteau, c'est donc un appui simple. Nous avons considéré les mêmes conditions aux limites pour la poutre-dalle à simuler. Le schéma simplifié du modèle est présenté dans la figure 5.7.

La poutre-dalle a une longueur totale de 14,4 mètres, la portée entre deux appuis mesure 9,4 mètres. La longueur de la partie suspendue en amont de la rotule est de 3 m, et celle en aval de l'appui simple est de 2 m. La largeur et la hauteur de la section b et h sont respectivement égales à 1 m et 0,35 m. La distribution des armatures dans les sections est également présentée. Les différents équipements des aciers mènent à 5 sections différentes. Le nombre et les diamètres des aciers dans chaque type de section sont listés dans le tableau 5.3

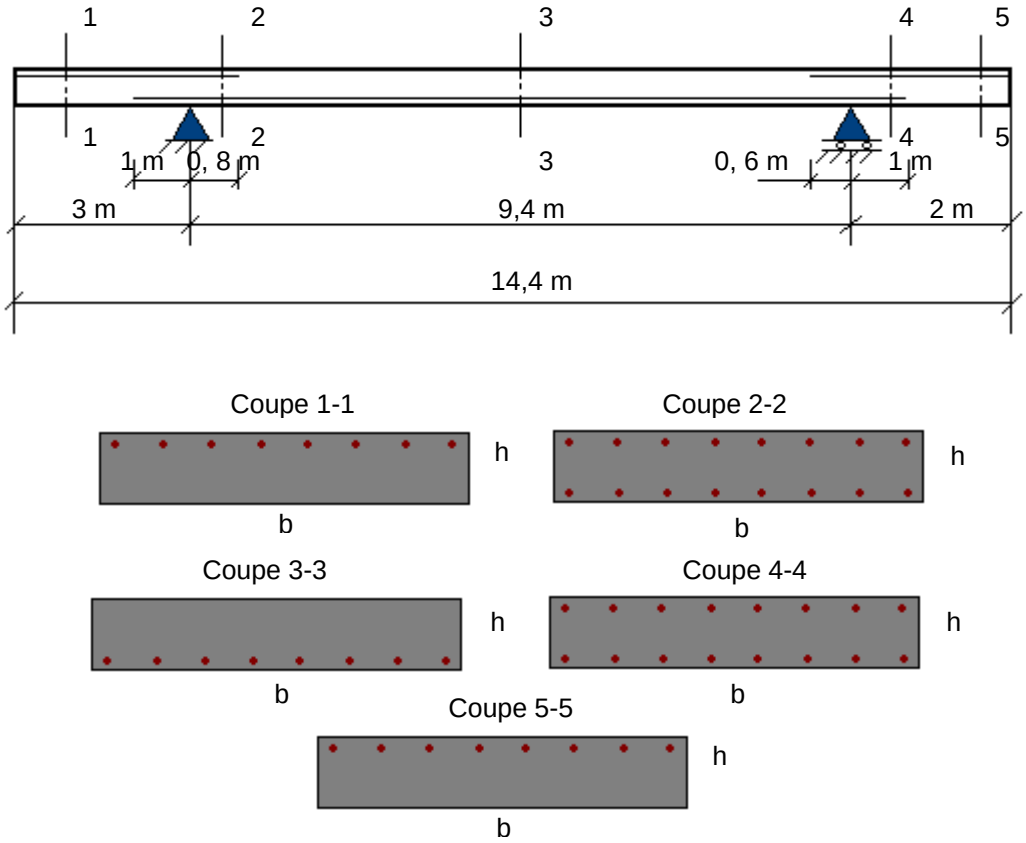


Figure 5.7 Schéma simplifié du modèle de la simulation.

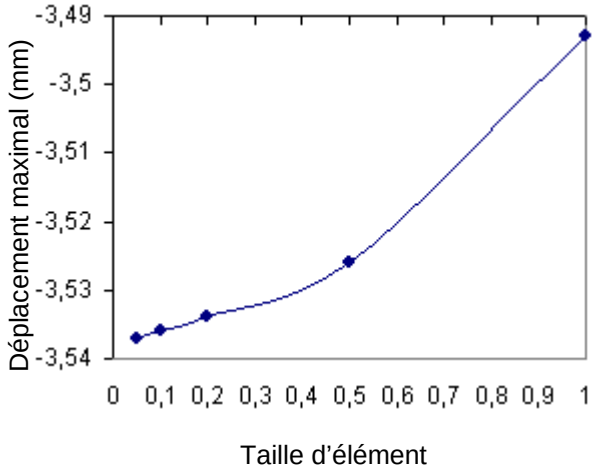
	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4	Section 5
Partie supérieure	4HA16+4HA20	4HA16+4HA20	-	8HA12	8HA12
Partie supérieure	-	8HA25	8HA25	8HA25	-

Tableau 5.3. Aciers dans chaque section.

5.3.1.3 Taille d'éléments

Les résultats de simulation avec l'élément de type Timoshenko sont liés à la taille d'élément. Plus le nombre de nœuds est élevé, plus les résultats sont de bonne qualité. En revanche, le temps de calcul augmente et peut très rapidement devenir important. Dans un premier temps, nous avons essayé d'estimer l'influence de la taille des éléments sur les résultats afin de déterminer une taille d'élément « optimale ». Des calculs en statique linéaire et non linéaire ont été effectués. Les résultats de la flèche maximale de la structure en fonction de la taille des éléments sont présentés dans la figure 5.8. Les deux courbes montrent une convergence de résultat en fonction de la diminution de la taille des éléments. A partir d'une taille de 0,2 m,

l'écart du résultat par rapport à celui calculé avec une taille d'élément de 0,05 m est faible (voir le tableau 5.4), mais le temps de calcul est 3 fois moins long. Par conséquent, nous avons choisi une taille d'élément de 0,2 m pour les calculs suivants.



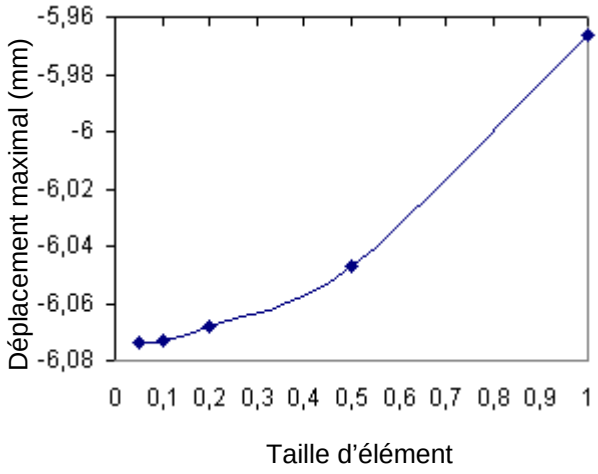


Figure 5.8 Relation entre la flèche au milieu de la dalle et le nombre de nœuds utilisé : a. Calcul en statique linéaire. b. Calcul en statique non linéaire.

Taille d'élément (m)	Flèche maximale au mieux de la structure (mm)			
	Calcul linéaire	Ecart (%)	Calcul non linéaire	Ecart (%)
1	-3,493	1,244	-5,966	1,778
0,5	-3,526	0,311	-6,047	0,445
0,25	-3,534	0,085	-6,068	0,099
0,1	-3,536	0,028	-6,073	0,016
0,05	-3,537	0	-6,074	0

Tableau 5.4 Influence de la taille d'élément.

5.3.2 Sollicitations dues à des avalanches réelles

D'après résultats obtenus au Lautaret (chapitre 4.1), nous avons constaté que les sollicitations d'impact des avalanches de neige sur une structure peu inclinée ont un comportement transitoire et une durée totale variant entre quelques secondes et une vingtaine de secondes. La durée du « pic » de sollicitation est souvent comprise entre une seconde et une dizaine de secondes. Nous les appelons respectivement « montées rapides » (figure 5.9 a) et « montées lentes » (figure 5.9 b). Dans le cadre d'un master effectué au sein de laboratoire 3S-R à Grenoble, plusieurs études de la galerie paravalanche de Montaulever ont été effectuées. D'après les analyses modales des travaux de [Martinez Granados 2007], la première fréquence propre de l'ensemble de la dalle, des poutres et des entretoises est de 14,22 Hz ou de 6,58 Hz selon un modèle choisi. La première période est donc de 0,07 s ou 0,15 s. Celle-ci est inférieure à la durée du pic la plus courte (1 s), à priori, nous pouvons considérer que l'interaction entre une avalanche et une structure peu inclinée est un impact lent. Les différents types de chargement ne doivent pas avoir une influence sur les réponses de la structure.

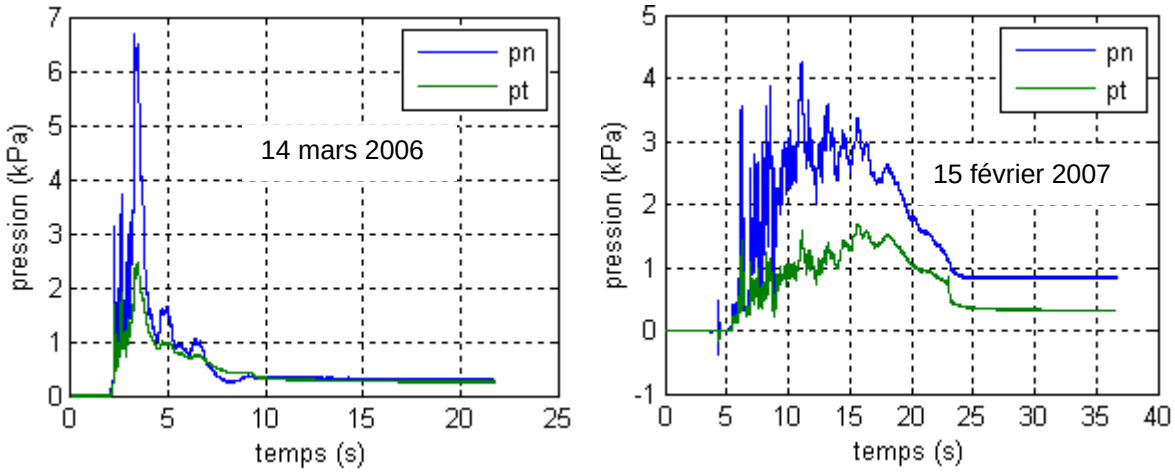


Figure 5.9 Deux chargements typiques.

Par conséquent, nous avons appliqué la forme de chargement du 14 mars 2006. Les forces nodales appliquées sont données dans la figure 5.10. Pour simuler la variation spatiale de sollicitations sur la dalle, nous avons décalé dans le temps les sollicitations pour chaque nœud. Le pas de temps est de 0,006333 s, le temps de décalage entre les deux nœuds d'un élément est supposé équivalent au pas de temps, cela signifie que la vitesse d'avalanche est de 31,6 m/s. Le temps de décalage total entre le dernier nœud et le premier est d'environ 0,46 s.

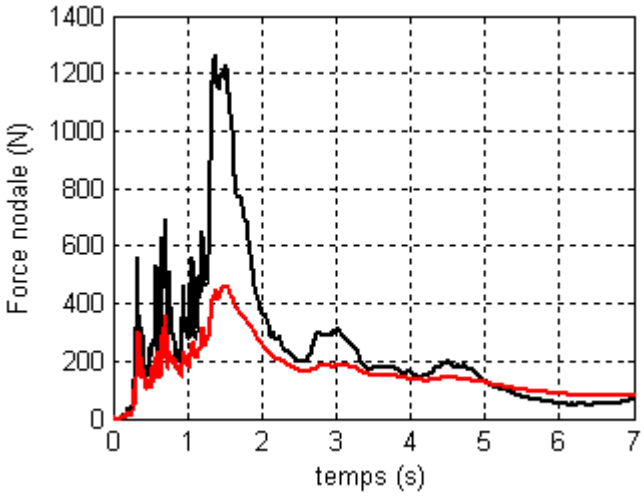


Figure 5.10 Forces nodales appliquées (issues du chargement obtenu avec l'avalanche du 14 mars 2006).

Dans un premier temps, nous avons réalisé les analyses modales de la structure. Les quatre premières fréquences propres sont listées dans le tableau 5.5.

Fréquences propres du modèle poutre-dalle (Hz)			
f_1	f_2	f_3	f_4
5,11	12,86	22,76	36,26

Tableau 5.5 Premières quatre fréquences propres.

Dans les travaux de [Martinez Granados 2007], plusieurs modèles ont été proposés pour représenter la structure de la galerie paravalanche du Montaulever. Concernant les modèles globaux, il y a le modèle PED simplifié correspondant à l'ensemble des deux poutres longitudinales, des entretoises et de la dalle, et le modèle simplifié précédent et en rajoutant les poteaux en amont et en aval. Dans le tableau 5.6, nous présentons les fréquences propres de ces deux modèles. Les valeurs sont du même ordre de grandeur de celles obtenues avec notre modèle. Les différences entre les modèles s'expliquent facilement par les masses prises en compte.

Fréquence propre du modèle PED simplifié (Hz)				Fréquence propre du modèle Total simplifié (Hz)			
f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
14,22	16,23	28,26	35,14	6,58	15,15	17,88	18,65

Tableau 5.6 Fréquences propres des modèles de la galerie paravalanche de Montaulever [Martinez Granados 2007].

Dans la suite, nous présentons les réponses de la structure en calcul dynamique. La figure 5.11 donne les efforts verticaux en fonction du temps dans l'appui en amont (articulation). La forme de la courbe est similaire à celle des sollicitations appliquées. Après avoir atteint l'effort maximal (à t=1,819 s), les signaux des réponses deviennent très perturbés, mais la valeur moyenne reste peu variable.

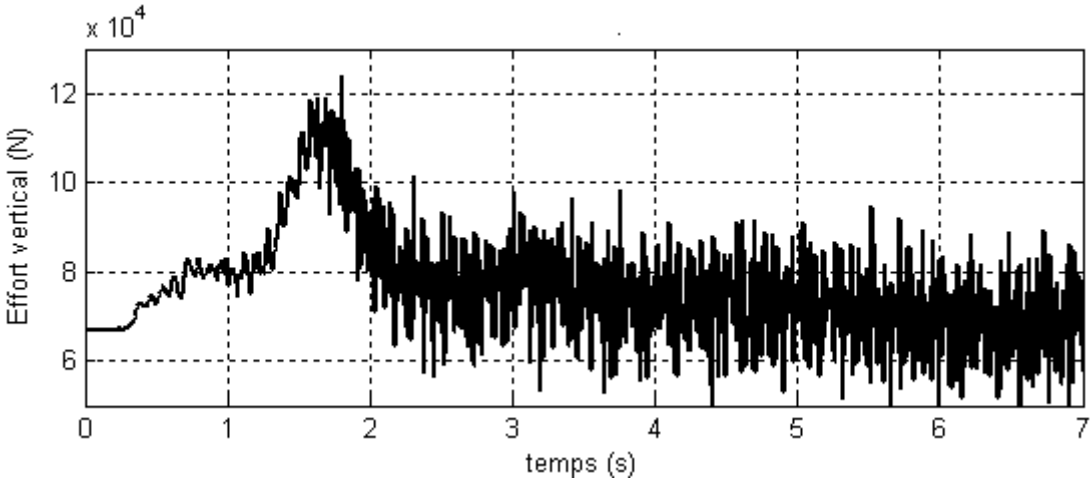


Figure 5.11 Effort normal en fonction du temps dans l'appui à gauche (en amont).

Sur la figure 5.12, les efforts normaux dans l'appui en amont (articulation) et en aval (appui simple) dans les trois premières secondes sont présentés. La valeur maximale dans l'appui en amont est d'environ 120 kN et celle dans l'appui en aval est de 105 kN. L'effort dans l'appui en amont est un peu plus important, ce qui est assez logique du fait de la géométrie de l'ouvrage. Selon les courbes, nous remarquons qu'il y a un décalage de temps d'environ 0,12 s entre les deux pics des efforts. Cela provient de la variation spatiale des sollicitations.

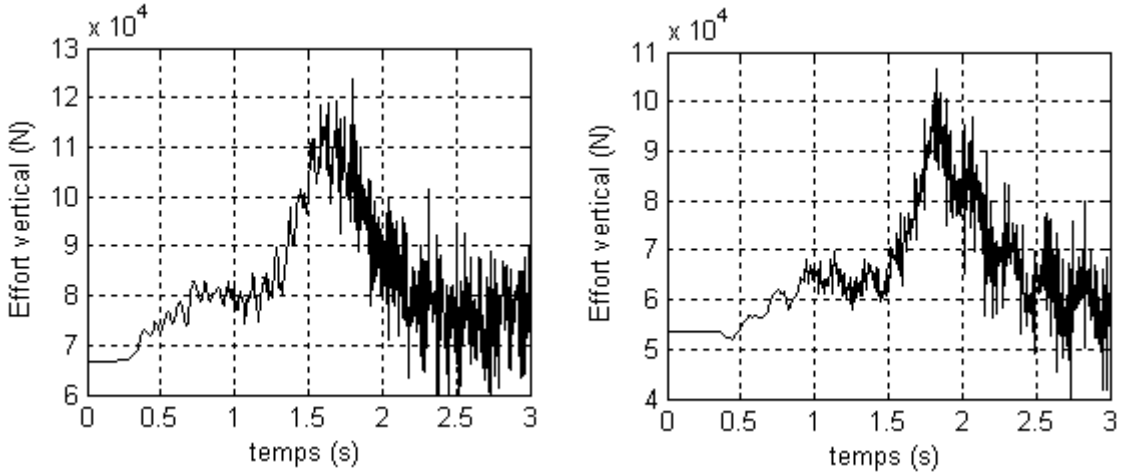


Figure 5.12 Efforts verticaux dans les appuis. a. Appui en amont (articulation). b. Appui en aval (appui simple).

La figure 5.13 a présente le déplacement maximal dans la structure. Le déplacement atteint sa valeur maximale de 2,736 cm à t= 1,816 s. La figure 5.13 b donne la variation temporelle du coefficient d'endommagement en traction D_1 au milieu de la poutre-dalle. D'après la courbe, la structure commence à s'endommager à t = 0,884 s. A t = 1,806 s, le coefficient d'endommagement en traction D_1 atteint sa valeur maximale à 0,9413.

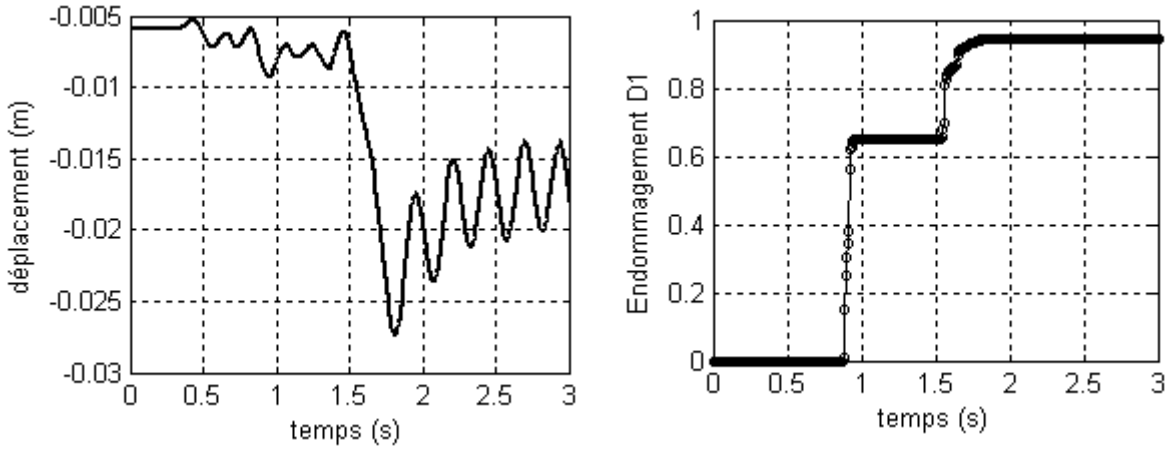


Figure 5.13 Réponses au milieu de la poutre-dalle. a. Variation temporelle du déplacement maximal b. Variation temporelle du coefficient D_1 au milieu de la partie base de la poutre-dalle.

Pour avoir une vision globale de l'endommagement du béton dans la structure, nous avons extrait le coefficient d'endommagement en traction D_1 dans les fibres du béton à chaque niveau de couche (suivant la hauteur) dans chaque élément (suivant la longueur) à un instant donné. La visualisation des valeurs du coefficient de D_1 permet de mieux comprendre la distribution de l'endommagement dans la structure. La figure 5.14 présente la visualisation de D_1 dans la structure à t = 2 s. Les endommagements se trouvent entre 5,5 m et 10,5 m (quasiment au milieu de la poutre-dalle) dans la partie inférieure de la structure.

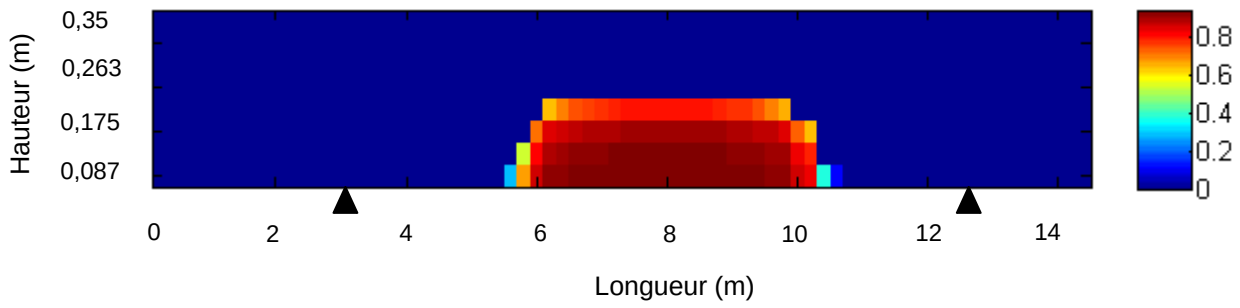


Figure 5.14 Valeur du coefficient d'endommagement en traction dans la poutre-dalle à t=2 s.

5.3.3 Simulations statiques

Le dimensionnement de la structure réelle est basé sur le calcul statique, les effets dynamiques ne sont donc pas pris en compte. Pour étudier les influences dues au chargement dynamique sur la structure, nous avons effectué des simulations sous chargements statiques. La comparaison entre les résultats statiques et dynamiques nous a permis de quantifier l'effet de la sollicitation dynamique.

Le tableau 5.7 présente les résultats de la simulation en statique correspondant au calcul sous un chargement composé du poids propre de la structure et la valeur maximale du chargement avalancheux du 14 mars 2006. Le poids propre sur chaque nœud est de 1,716 kN, et la force normale et tangentielle appliquée à chaque nœud est de 1,202 kN et 0,4 kN respectivement. N_g et T_g représentent l'effort normal et l'effort tangentiel dans l'appui à gauche, N_d est l'effort normal dans l'appui à droite, d_max est le déplacement maximal de la structure.

Les efforts dans les appuis sont légèrement en dessous de ceux qui sont obtenus en calcul dynamique, même s'ils restent dans même l'ordre de grandeur. Par contre, le déplacement maximal, égal à 1,797 cm, est plus faible que celui en calcul dynamique.

Force appliquée (kN)		Poids propre	N_g	T_g	N_d	d_max
normale	tangentielle	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(cm)
1,202	0,4	1,716	113	-28,31	90,67	1,797

Tableau 5.7 Réponses de la structure sous chargements statiques.

La distribution de l'endommagement est présentée sur la figure 5.15. Le niveau d'endommagement de la structure est moins élevé que celui avec le calcul dynamique (voir figure 5.14).

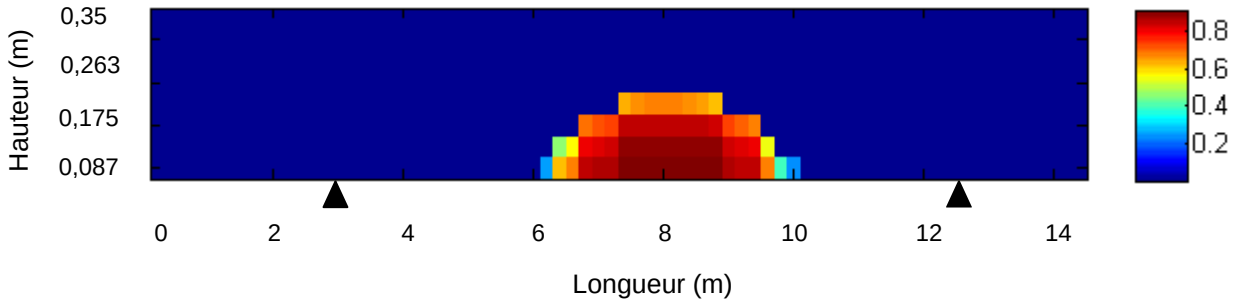


Figure 5.15 Distribution de l'endommagement du béton en calcul statique.

5.3.4 Comparaison

Pour quantifier l'effet dynamique sur la structure, nous avons augmenté la force appliquée en calcul statique pour obtenir un déplacement maximal équivalent à celui en calcul dynamique. La comparaison des résultats du calcul statique et dynamique est présentée dans le tableau 5.8. Nous voyons qu'il faut appliquer des sollicitations statiques normales et tangentielles respectivement 1,52 et 1,72 fois plus importantes que les sollicitations dynamiques (en valeur maximale) pour avoir le même déplacement maximal de la structure. L'effet dynamique de l'avalanche n'est donc pas négligeable.

Type de calcul	Force nodale appliquée (kN)		N_g (kN)	N_d (kN)	D_max (cm)
	Normale	Tangentielle			
Statique_1	1,202	0,4	113	90,67	1,797
Dynamique (max)	1,202	0,4	120	105	2,736
% (S/D)	-	-	94,2	86,4	65,8
Statique_2	1,827	0,688	137,1	110	2,736
Dynamique (max)	1,202	0,4	120	105	2,736
% (S/D)	152	172	114	105	-

Tableau 5.8 Comparaison des résultats calculés avec le chargement statique et dynamique.

Au niveau d'endommagement, la structure arrive à un état similaire à celui obtenu avec le calcul dynamique (voir figure 5.16).

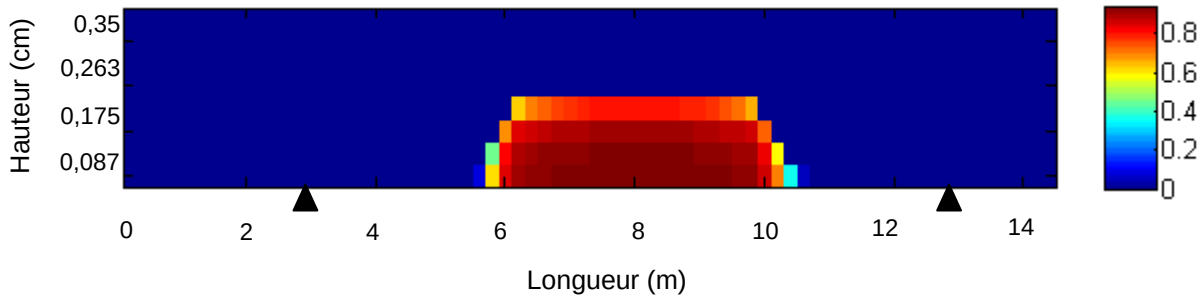


Figure 5.16 Distribution de l'endommagement en traction du béton pour le calcul statique_2.

5.4 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons étudié les réponses dynamiques d'une structure simplifiée de la galerie paravalanche de Montaulever avec le logiciel Fedeaslab. L'objectif est d'utiliser un modèle simplifié en 2D pour pouvoir appliquer un chargement complexe et enfin déterminer l'existence d'un effet dynamique dû à l'avalanche de neige sur la structure.

Un modèle de poutre-dalle homogénéisé constitué de l'ensemble de la dalle, de deux poutres longitudinales et de deux entretoises a été utilisé. Elle fait 14,4 m de long, 0,35 m d'épaisseur et 1 m de large. Un état de déformation plane a été considéré suivant l'axe z pour bien représenter la structure réelle. La liaison avec le poteau amont est simplifiée avec une rotule et celle aval est un appui simple.

Pour mieux représenter l'effet d'une avalanche sur la galerie, nous avons pris en compte la variation spatio-temporelle des sollicitations. Les résultats de la simulation montrent que la structure s'endommage rapidement sous le chargement avalancheux « réel » du 14 mars 2006, sachant que les valeurs des sollicitations de cette avalanche ne sont pas très importantes. Pour quantifier l'effet dynamique dû à une avalanche de neige sur la structure, nous avons effectué le calcul sous chargement statique. La comparaison des résultats dynamiques et statiques montre que l'effet dynamique n'est pas négligeable. Mais cela ne présente pas un risque important pour la structure, car la différence en termes d'endommagement n'étant pas très élevée.

En faisant le lien avec les résultats sur les écoulements granulaires en canal présentés dans le chapitre 4.2, nous pouvons conclure que l'élément critique du dimensionnement d'une galerie paravalanche est le positionnement de celle-ci par rapport à la rupture de pente. Si les sollicitations d'impact dues à l'écoulement sur une structure ont des valeurs très importantes à la rupture de pente, elles décroissement rapidement avec la distance. Pour un écoulement type avec une ouverture de porte de 20 cm dont le comportement est similaire à une avalanche de neige réelle, le rapport entre les sollicitations maximales et minimales est d'environ 8.

Sachant que les méthodes pour déterminer les pressions d'une avalanche sur la structure de galerie paravalanche donnent des valeurs beaucoup moins importantes que celles mesurées, il est dangereux pour les structures de se trouver proche de la rupture de pente. Une distance nécessaire ($x' \geq 5$) pour éviter la zone d'impact a été proposée par K.Plazter et mise en norme par les suisses ($x' = 6$). Notre étude sur les écoulements granulaires arrive à une conclusion similaire.

Actuellement, rien n'a été précisé dans les documentations françaises sur la position de la galerie par rapport à la rupture de pente. De plus, dans la réalité, la position est souvent limitée par la topographie. La condition $x' \geq 5$ ne peut pas être toujours respectée. De plus si la distance initiale est suffisante, elle peut varier temporairement avec le temps selon différents niveaux de couvrement de neige et peut être modifiée au fur et à mesure des changements de la topographie en amont de la structure (dépôt du sol, rocher …). Le danger potentiel n'est donc pas négligeable.

Conclusion générale

Ce travail de thèse est constitué de deux parties, une première qui a consisté à caractériser un écoulement de neige lors de son arrivée sur une galerie et une deuxième qui est la quantification des efforts produits sur l'ouvrage de protection.

Dans la première partie, nous avons étudié les sollicitations d'impact des écoulements gravitaires sur des structures de type galerie peu inclinées. Deux expérimentations ont été réalisées. Une consistant en une plaque instrumentée de capteurs de force sur le site expérimental du col du Lautaret et l'autre consistant en un écoulement granulaire dans un canal incliné en laboratoire. La plaque instrumentée de capteurs de force au Lautaret nous a permis de mesurer les sollicitations d'impact normales et tangentielles dues aux avalanches de neige réelles. Ce sont des mesures rarement faites sur un site naturel. Différents comportements de chargement ont été observés grâce aux enregistrements temporels (pics avec une durée rapide, lente ou paliers). La grande variabilité des paramètres comme la vitesse, l'épaisseur et la densité de l'avalanche conduit à cette grande différence de comportement parmi les cinq avalanches étudiées. Le ratio entre les pressions tangentielles et normales a été mesuré entre 0,2 et 0,6, ce qui est souvent plus élevé que la proposition des experts français et équivalent à la proposition de la nouvelle norme suisse. Par contre, les expériences sur le site réel ont été limitées du fait des conditions météorologiques qui ont grevé le nombre d'essais. Pendant trois années d'expérience, nous avons pu déclencher cinq avalanches de neige et obtenu autant de résultats de sollicitations différentes. De plus, les avalanches déclenchées ont été de tailles et caractéristiques différentes, d'où une grande variabilité des sollicitations mesurées ne permettent pas une généralisation des résultats obtenus. Enfin, les conditions topographiques ont limité la position de la plaque. Pendant toutes les périodes de mesure, la plaque a été fixée en dessous de la route de Galibier, l'angle d'inclinaison est resté de 10° par rapport à l'horizontal. L'évolution spatiale n'a donc pas été étudiée. Ce manque rencontré a été en partie comblée par des expériences sur écoulements granulaires dans un canal incliné. Avec ce modèle réduit, nous avons pu contrôler les conditions initiales comme l'inclinaison du canal, l'ouverture initiale de la porte (flux de particules) et la position du capteur. Les caractéristiques de l'écoulement ont été mesurées, et une bonne reproductibilité des essais a été obtenue. La variation des positions de capteur nous a permis d'obtenir les évolutions spatiales des sollicitations d'impact, afin de quantifier l'effet d'impact en fonction de la position après la rupture de pente. D'après les résultats expérimentaux, les sollicitations d'impact ont des valeurs maximales à la rupture de pente, elles décroissent ensuite rapidement avec l'augmentation de la distance de déviation. A partir d'une certaine distance (d'environ $x/h>5$), l'effet d'impact devient négligeable et la théorie représente bien ces phénomènes. Le rapport entre les sollicitations d'impact maximales et les pressions hydrostatiques est compris entre 5 et 16 selon les différents types d'écoulement. Pour un écoulement granulaire avec une ouverture initiale de porte de 20 cm dont le comportement est similaire à celui d'une avalanche de neige réelle, ce rapport est d'environ 8. L'effet d'impact à la rupture de pente est donc important.

Avec les mesures des caractéristiques d'écoulement (profil de vitesse, profil de densité, épaisseur de l'écoulement), nous avons validé les méthodes d'ingénieur pour calculer les pressions d'impact de l'avalanche de neige sur la galerie. La première méthode de calcul est basée sur le principe d'impact d'un jet d'eau sur une plaque fixe. Cette méthode est actuellement utilisée en France. La deuxième méthode est basée sur la première méthode en rajoutant une pression hydrostatique, proposée par [Platzer 2006]. Les résultats montrent que,

dans la zone de fort impact, les pressions calculées avec les deux méthodes sont beaucoup plus faibles que celles mesurées. Les deux méthodes ne peuvent donc pas décrire le phénomène de fort impact. Par contre, hors de la zone de fort impact, la méthode suisse donne des résultats plus cohérents avec les mesures.

Dans la deuxième partie, nous avons étudié les réponses dynamiques d'une structure simplifiée d'une galerie paravalanche en appliquant la forme des sollicitations des avalanches réelles obtenues au Lautaret. Les simulations ont été réalisées avec le logiciel éléments finis Fedeaslab qui permet de simuler les réponses linéaires ou non linéaires des structures sous chargements statiques ou dynamiques. La structure simplifiée est basée sur une poutre-dalle en béton armé de 14,4 m de longueur, avec une portée entre appuis est de 9,4 m, 1 m de largeur et 0,35 m d'épaisseur. La loi d'endommagement de La Borderie pour le béton et le modèle Menegotto-Pinto pour l'acier ont été utilisés. Pour mieux simuler une avalanche de neige passant sur la dalle de la galerie paravalanche, le chargement ne s'applique pas simultanément sur l'ensemble de la structure mais a été décalé dans le temps selon la distance. Les simulations ont donc été basées sur une structure simple sous un chargement complexe. La comparaison entre les résultats calculés en dynamique (sollicitations avalancheuses) et en statique (valeur maximale des sollicitations avalancheuses) montre que l'effet dynamique n'est pas négligeable. De plus, la structure s'endommage rapidement avec le calcul en dynamique. Bien sûr, en négligeant les entretoises au milieu de la dalle, la poutre-dalle que nous avons simulée est moins rigide que la structure réelle, mais les résultats ont la même tendance. Cela mène à reconsidérer le danger potentiel lié à la position de la galerie par rapport à la rupture de pente. Effectivement lorsque la distance entre l'ouvrage et la rupture de pente est faible (soit due à la conception initiale, soit due à une évolution de la topographie dans le temps), la structure peut très rapidement s'endommager et aussi ne plus remplir son rôle de protection.

Perspectives

Nous pensons que les mesures de sollicitations avalancheuses sur la plaque au Col du Lautaret doivent être poursuivies. De nombreuses années de mesures peuvent créer une base de données fiable. Les manques sur les caractéristiques de l'avalanche devraient être comblés par le Cemagref qui envisage de développer et améliorer des méthodes de mesures. Les plus performantes méthodes de mesure peuvent permettent de mieux comprendre le comportement des avalanches et des sollicitations d'impact.

Quant à la structure, la simulation avec un chargement en dynamique exige un temps de calcul très long. C'est pour cette raison que nous avons simplifié l'ensemble de la dalle de galerie en une poutre-dalle simple. La poutre transversale et les entretoises qui sont en dessous de la dalle n'ont été pas prises en compte. La structure simplifiée est représentative de la structure réelle, mais il est toujours mieux de représenter la structure le plus réaliste possible. Des modèles en 3D comportant tous les éléments peuvent être développés avec avantage.

Bibliographie

[Ammann 1999] Ammann W.J., *A new Swiss test-site for avalanche experiments in the Vallée de la Sionne/Valais*. Cold regions science and technology Vol. 30, p3-11.

[Ancey] Ancey, C., L*es Avalanches en Ingénierie*. http://www.toraval.fr/avalanche.php.

[Ancey 1997] Ancey, C., *Chapitre 8 : Génie paravalanche, viabilité hivernale*. Guide Neige et Avalanches, ANENA, 1997, p197-208.

[Ancey 2005] Ancey, C., *Une petite histoire du génie paravalanche*. Revue de l'ANENA, N°112, p2-5.

[Ancey 2006] Ancey C., Livre : *Dynamique des avalanches.*

[Ancey et Evesque 2000] Ancey C., Evesque P., *Frictional-collisional regime for granular suspension flows down an inclined channel.* Physical Reviewe Vol.62, 2001.

[Andreotti et al 2002] Andreotti B., Daerr A., Douady S., *Scaling laws in granular flows down a rough plane.* Physics of fluids Vol. 14, 2002.

[Aranson et Tsimring 2001] Aranson I.S, Tsimring L.S, *Continuum description of avalanches in granular media*. Physical Reviewe, Vol. 64.

[Baeza 2004] Baeza A., *Conception d'un dispositif de mesure des efforts exercés par une avalanche sur un ouvrage de type galerie*, Rapport de stage de fin d'étude (3A), Polytech'Grenoble, 2004.

[Bagnold 1954] Bagnold R.A., Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. Proc. Roy. Soc. London, Vol.225, pp54-63, 1954.

[Barbolini et al. 2000] Barbolini M., Gruber U., Keylock C.J., Naaim M., Savi F., *Application of statistical and hydraulic-continuum dense-snow avalanche models to five real European sites*. Cold regions science and technology, Vol. 31, p133-149, 2000.

[Barbolini et al. 2005] Barbolini M., Biancardi A., Natale L., Pagliardi M., *A low cost system for the estimation of concentration and velocity profiles in rapid dry granular flows.* Cold regions science and technology, Vol. 43(1-2), pp.49-61.

[Berthet-Rambaud 2004] Berthet-Rambaud, P., *Structures rigides soumises aux avalanches et chutes de blocs : Modélisation du comportement mécanique et caractérisation de l'interaction "phénomène-ouvrage"*, thèse de Doctorat, 2004, L'université Joseph Fourier.

[Bouchet 2003] Bouchet A., *Etude expérimentale des avalanches denses de neige sèche.* Thèse de Doctorat, Grenoble, Université Joseph Fourier.

[Casassa et al. 1991] Casassa G., Narita H., Maeno N., Shear cell experiments of snow and ice friction. Journal of applied Physics, Vol.69 (6), pp3745-3755.

[CETE 1979] Documentation du Ministère des transports, CETE d'Aix en Provence, *Les ouvrages paravalanches*, 1979.

[Da Cruz 2004 et al. 2004] Da Cruz F., Chevoir F., Prochnow M., Rognon P., Roux J.N., *Dense granular flows: friction and jamming*, Proceedings of the 17th ASCE Engineering Mechanics Conference, Newark, 2004.

[Daerr, 2000] Daerr A., *Dynamique des Avalanches*, Thèse de Doctorat, Université Denis Diderot Paris 7, 2000.

[Dent et al. 1983] Dent J.D., Lang T.E., *A biviscous modified bingham model of snow avalanche motion*, Annals of glaciology, Vol.4, pp42-46.

[Dent et al. 1998] Dent J. D., Burrell K.J., Schmidt D.S., Louge M., Adams E.E., Jazbutis T.G, Density, V*elocity and friction measurements in a dry-snow avalanche*, Annals of glaciology, Vol.26, pp247-252.

[Faug 2004] Faug T., *Simulation sur modèle réduit de l'influence d'un obstacle sur un écoulement à surface libre*, Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, 2004.

[Gauer et al. 2008] Gauer P., Karstein L., Krister K., *On avalanche measurements at the Norwegian full-scale test-site Ryggfonn*, Cold regions science and technology, Vol.51 (2-3), pp138-155, 2008.

[GDR MiDi 2004] GDR MiDi, *On dense granular flows.* Eur. Phys. J. E, Vol.14, p341-365, 2004.

[Goldhirsh 2003] Goldhirsch I., *Rapid granular flows*, Rev. Fluid Mech, Vol.35, pp 267-293, 2003.

[Goujon et al. 2003] Goujon C., Thomas N., Dalloz-Dubrujeaud B., *Monodisperse dry granular flows on inclined planes: Role of roughness*. Eur. Phys. J. E Vol. 11, p147-157.

[Harbitz et al. 1998] Harbitz C.B., ISSLER D., KEYLOCK C.J, *Conclusions from a recent survey of avalanche computational models.* Publikasjon - Norges Geotekniske Institutt ISSN 0078-1193 vol. 203, p128-139, 1998.

[Hutter et al. 1995] Hutter K., Koch T., Plüss C., Savage S.B., *The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part II. Expériments.* Acta Mechanica, Vol. 109, pp.127-165, 1995.

[Iverson et Vallance 2001] Iverson R.M, Vallance J.W, *New views of granular mass flows*. Geological Society of America, Vol. 29, p115-118, 2001.

[Jop et al. 2005] Jop P., Forterre Y., Pouliquen O., *Crucial role of side walls in granular heap flows: consequence for the rheology*, J. Fluid. Mech. 541, p167-192.

[Jop et al. 2005] Jop P., Forterre Y., Pouliquen O., *Crucial role of side walls in granular heap flows: consequence for the rheology*, J. Fluid. Mech. 541, p167-192.

[Jop et al. 2005] Jop P., Forterre Y., Pouliquen O., *Comment coule le sable? Vers une rhéologie des écoulements granulaires.* Colloque changement d'échelle : du nano au macroscopique, 2005.

[Jop 2006] Jop, P., *Ecoulements granulaires sur fond meuble*, Thèse de docotrat, Universié de Provence, 2006.

[Josserand et al. 2005] Josserand C., Lagrée P.Y, Lhuillier D., *Un nouveau modèle pour les milieux granulaires denses en écoulement*, 17ème Congrès Français de Mécanique, 2005.

[Keylock et Barbolini 2001] Keylock C.J, Barbolini M., *Snow avalanche impact pressure-vulnerability relations for use in risk assessment.* Geotech. J. 38, p227-238, 2001.

[Kerna et al. 2004] Kerna M.A., Tiefenbachera F., McElwaineb J.N., *The rheology of snow in large chute flows.* Cold regions science and technology, Vol.39, p181– 192.

[Kotronis 2000] Kotronis P., *Cisaillement dynamique de murs en béton armé. Modèle simplifié 2D et 3D.* Thèse de doctorat, Ecole normale supérieure de CACHAN, Paris, 2000.

[Kotronis et Mazars 2005] Kotronis P., Mazars J., *Simplified modeling strategies to simulate the dynamic behaviour of R/C walls.* Journal of Earthquake Engineering, Vol.9, No.2 (Imperial College Press), p286-306, 2005.

[La Borderie 1991] La Borderie, C.L., *Phénomènes unilatéraux dans un matériau endommageable : Modélisation et application à l'analyse des structures en béon*, Thèse de doctorat , Université Paris 6, 1991.

[Louge et al. 1997] Louge M.Y, Steiner R., Keast S.C, Decker R., Dent J., Schneebeli M., *Application of capacitance instrumentation to the measurement of density and velocity of flowing snow.* Cold regions science and technology, Vol. 25, pp. 47-63, 1997.

[Lueptow et al. 2000] Lueptow R. M., Akonur A., Shinbrot T., *PIV for granular flows.* Experiments in Fluids, Vol. 28, pp.183-186, 2000.

[Martinez Granados 2007] Martinez Granados I., *Analyse par éléments finis d'une galerie paravalanche en béton armé*, rapport de fin de stage de master 2, Université de Joseph Fourier, 2007.

[Martinez Granados 2007] Martinez Granados I., *Analyse par éléments finis d'une galerie paravalanche en béton armé.* Rapport de fin de stage Master 2, Université Joseph Fourier, 2007.

[Mazars et al. 2006] Mazars J., Kotronis P., Ragueneau F., Casaux G., *Using multifiber beams to account for shear and torsion: Applications to concrete structural elements.* Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.195 (52), p7264-7281.

[Menegotto et Pinto 1973] Menegotto M., Pinto P.E., *Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non elastic behavior of elements under combined normal force and bending*, final report, Lisbon, 1973.

[Meunier et al. 2004] Meunier M., Ancey C., Taillandier J.M., *Fitting avalanche-dynamics models with documented events from the Col du Lautaret site (France) using the concptual approach.* Cold regions science and technology Vol. 39 55-66, 2004

[Naaim-Bouvet et Naaim 2000] Naaim-Bouvet F., Naaim M., *Avalanche mixte de neige sèche sans cohésion considérée comme un écoulement granulaire.* Livre : La neige recherche et réglementation, p169-228. Cemagref Edition

[Nguyen 2006] GUYEN X. H., *Vulnérabilité des structures en béton armé à voiles porteurs: expérimentation et modélisation*. Thèse de Doctorat, INPG, Grenoble, 2006.

[Norem et al. 1987] Norem H., Bonsak F.I., Schieldrop B., *A continuum model for calculting snow avalanche velocities.* Avalanche Formation, Movement and Effects__(IAHS Publ.no.162), 1987

[Onera] (http://www.onera.fr/conferences/mesures-aerodynamique/16-piv.php).

[Platzer 2006] Platzer K., *Experimental investigation of avalanche forces acting on snow sheds*, University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna, Thesis, 2006.

[Perret et al. 2006] Perret L., Delville J., Manceau R., Jean-Paul B., *Generation of turbulent inflow conditions for large eddy simulation from stereoscopic PIV measurements*. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 27(4), pp.576-584.

[Perla et al. 1980] Perla R., Cheng T.T., McClung D.M., *A two-parameter model of snow-avalanche motion*, Journal of Glaciology, Vol.26, pp197-207.

[Platzer et al. 2004]. Platzer K.M., Margreth S., Bartelt P., *Granular flow experiments to investigate dynamic avalanche forces for snow design.* Snow Engineering, 2004

[Platzer 2006] Platzer K.M., *Experimental investigation of avalanche forces acting on snow sheds*, Thèse de doctorat, University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna, 2006].

[Pouliquen 1998] Pouliquen O., *Scaling laws in granular flows down rough inclined planes.* Physics of fluids, Vol.11, 1998.

[Pouliquen et Forterre 2001] Pouliquen O., Forterre Y., *Friction law for dense granular flows : application to the motion of a mass down a rough inclined plane.* J. Fluid, Vol. 453, p133-151, 2001.

[Pouliquen et Renaut 1996] Pouliquen O., Renaut N., *Granular Flows on an Inclined Rough Surface: Dilatancy Effects.* J. Phys. II France, Vol. 6, p923-935, 1996.

[Pouliquen et al. 2001] Pouliquen O., Forterre Y., Le Dizes S., *Slow dense granular flows as a self induced process*. WSPC/Guidelines.
[Pouliquen 2001] Pouliquen O., *Les milieux granulaires*, Cours à l'ENSTA.

[Pouliquen 1999] Pouliquen O., *On the shape of granular fronts down rough inclined planes*. Physics of fluids, Vol. 11, N° 7.

[Pouliquen 1999] Pouliquen O., *Scaling laws in granular flows down rough inclined planes.* Physics of fluids, Vol. 11, N° 3.

[Rabaud et al. 2005] Rabaud M., Fischer R., Courrech du Pon S., Gondret P., Perrin B., *Dynamique des avalanches granulaires*. 17ème Congrès Français de Mécanique, Troyes.

[Rajchenbach 2004] Rajchenbach J., *Ecoulements denses de grains sous gravité*. Rhéologie Vol. 7, p22-27.

[Rapin 2000] Documentation, *Route départementale n°117 (accès à Val-Thorens) Galerie Paravalanche de Montaulever*, 2000.

[Rapin 2001] Rapin, F., *Récapitulatif des techniques françaises de protection collective paravalanche.* Neige et Avalanches, ANENA, 2001, n°55.

[Recherches en aéroacoustique et aérodynamique]
(http://c.noger.free.fr/Francais/piv_2d_fr.php)

[Ofrou/cff 2007] Documentation directive : *Actions d'avalanches sur les galeries de protection*, 2007.

[Salm 2004] Salm B., *A Short personal history of snow avalanche dynamics.* Cold regions science and technology Vol 39, p83-92, 2004

[Savage et al. 1991] Savage S.B., Switzerland, Z., Hutter, K., *The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I: Analyse.* Acta Mechanica, Vol. 86, p201-223, 1991.

[Salm 1966] Salm B., *Contribution to avalanche dynamics*, International Association of Scientific Hydrology, Publication 69 (Symposium at Davos 1965—Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches), IAHS Press, Wallingford, Oxfordshire, UK, pp.199– 214.

[Savage et al. 1991] Savage S.B., Switzerland, Z., Hutter, K., *The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I : Analyse.* Acta Mechanica, Vol. 86, pp. 201-223, 1991.

[Steingart et Evans 2005] Steingart D. A., Evans J. W., *Measurements of granular flows in two-dimensional hoppers by particle image velocimetry. Part I: experimental method and results.* Chemical Engineering Science, Vol. 60 (4), pp.1043-1051.

[Tiefenbacher et Kern 2003] Tiefenbacher F., Kern M.A., *Experimental devices to determine snow avalanche basal friction and velocity profils.* Cold regions science and technology Vol. 38, p17-30.

[Vilajosana et al. 2007] Vilajosana I., Khazaradze G., Suriñach E., Lied E., Kristensen K., *Snow avalanche speed determination using seismic methods*, Cold regions science and technology, Vol.49(1), pp2-10.

[Weitbrecht et al. 2002] Weitbrecht V., Kühn G., Jirka G. H, *Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows.* Flow Measurement and Instrumentation, Vol.13 (5-6), pp.237-245.

Sites internet

www.snowgripper.at

www.geo.fr

Annexes

Annexe I. Mesure de la densité apparente

Nous avons d'abord pris une certaine quantité de billes et mesuré la masse m. Les billes ont été ensuite mises (sans tassées) dans une éprouvette graduée et le volume V_1 a été mesuré (figure 1 a). Dans une autre éprouvette graduée, nous avons mis le même volume de l'eau (figure 1 b). Enfin, nous avons versé les billes dans l'éprouvette graduée où il y avait de l'eau et nous avons obtenu le volume de mélange de l'eau et des billes V_2 (figure I-1 c). La différence entre V_2 et V_1 c'est le volume des billes absolus ΔV. La masse volumique des billes $\rho_{bille} = \frac{m}{\Delta V}$, la masse volumique apparente $\rho_{apparente} = \frac{m}{V_1}$. Nous avons fait deux fois de mesures et obtenu des résultats quasi identiques (tableau I-1). Pour le compacité, nous avons $\phi = \frac{\rho_{apparente}}{\rho_{bille}} = \frac{1637,78}{2348,08} = 0,6974 \approx 0,7$.

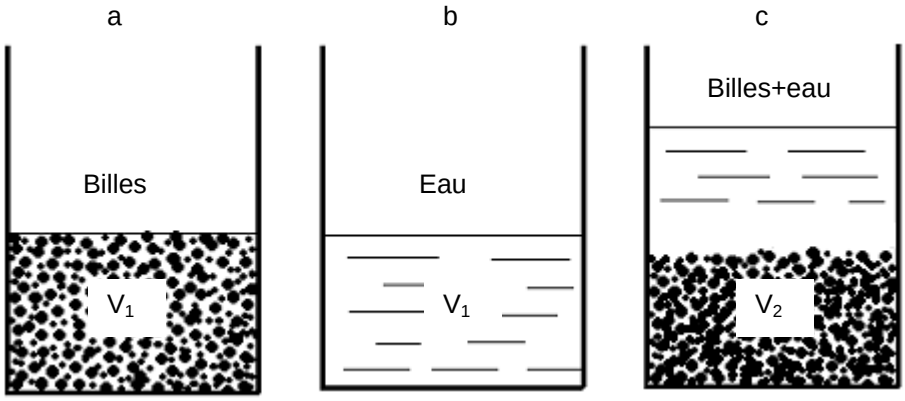
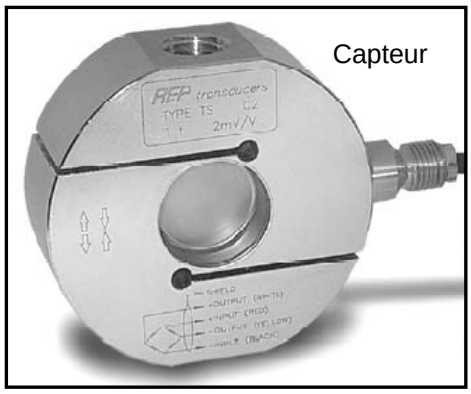


Figure I-1. Méthode de mesure de la densité apparente des billes

	m **(g)**	V_1 **(ml)**	V_2 **(ml)**	V_2 - V_1 **(ml)**	ρ_abs **(Kg/m^3)**	ρ_appar **(Kg/m^3)**
Essai 1	328,31	200	340	140	2345,07	1641,55
Essai 2	326,8	200	339	139	2351,08	1634
Moyen					2348,08	1637,78

Tableau I-1 : Mesures de la masse volumique absolue et apparente.

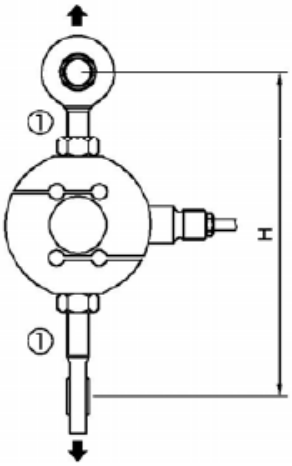
Annexe II. Capteur de force électrique TS20KN

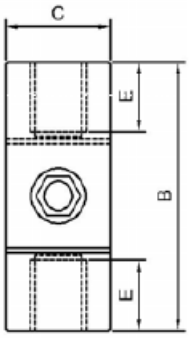


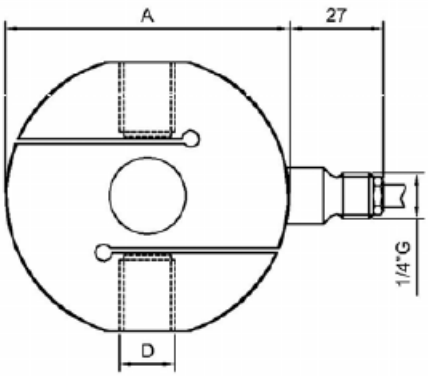
①
ACCESSORI
Teste a snodo sferico

ACCESSORIES
Knuckle joints

LOAD	CODE
25 ÷ 500 kg	CACCEM12
500 ÷ 2.5t	CACCEM16
2.5 t	CACCEM20
5, 7.5 t	CACCEM25







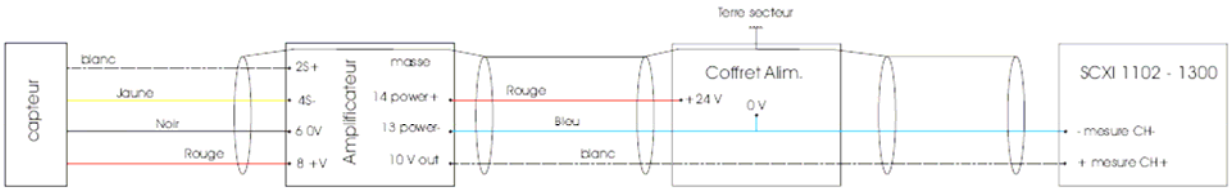
TS IN ACCORDANCE

CODE (C2)	CODE (C3)	LOAD	A	B	C	D	E	H
CTS6325KC25	CTS6325KC35	**25 kg**	63.5	59.5	22	M12X1.75	12	~ 134
CTS6350KC25	CTS6350KC35	**50 kg**						
CTS63100KC25	CTS63100KC35	**100 kg**						
CTS63200KC25	CTS63200KC35	**200 kg**						
CTS63300KC25	CTS63300KC35	**300 kg**						
CTS63500KC25	CTS63500KC35	**500 kg**						
CTS82500KC25	CTS82500KC35	**500 kg**	82	78	30	M16X2	20	~ 170
CTS821TC25	CTS821TC35	**1 t**						
CTS822TC25	CTS822TC35	**2 t**						
CTS822T5C25	CTS822T5C35	**2.5t**	82	78	30	M20X1.5	20	~ 194
CTS1025TC25	CTS1025TC35	**5 t**	102	90	45	M24X2	21.5	~ 235
CTS1027T5C25	CTS1027T5C35	**7.5t**						

CLASSE DI PRECISIONE: **OIML R60**	*ACCURACY CLASS: **OIML R60***	**C2**	**C3**	**C4**
DIVISIONI LEGALI	*LEGAL DIVISIONS*	2000	3000	4000
CARICO NOMINALE (E_{max})	*NOMINAL LOAD (E_{max})*	25 – 50 kg 100 – 200 – 300 - 500 kg 1 - 2 - 2.5 - 5 -7.5 t		500 kg 1-2-2.5 t
INTERVALLO MINIMO DI VERIFICA (V_{min})	*MINIMUM VERIFICATION INTERVAL (V_{min})*	E_{max} / 10000		E_{max}/15000
ERRORE COMBINATO NON RIPETIBILITA' RITORNO A ZERO dopo 30 min. CREEP al carico nominale: a) dopo 30 min. b) dopo 20 e 30 min.	*COMBINED ERROR* *NON REPEATABILITY* *ZERO RETURN over 30 min.* *CREEP at nominal load:* *a) over 30 min.* *b) over 20 and 30 min.*	≤ ±0.023% ≤ ±0.015% ≤ ±0.025% ≤ ±0.025% ≤ ±0.005%	≤ ±0.018% ≤ ±0.010% ≤ ±0.015% ≤ ±0.015% ≤ ±0.005%	≤ ±0.015% ≤ ±0.010% ≤ ±0.010% ≤ ±0.015% ≤ ±0.003%
EFFETTO DELLA TEMPERATURA (10 °C) a) sullo zero b) sulla sensibilità	*TEMPERATURE EFFECT (10 °C)* *a) on zero* *b) on sensitivity*	 ≤ ±0.028% ≤ ±0.012%	 ≤ ±0.010% ≤ ±0.010%	 ≤ ±0.008% ≤ ±0.008%
SENSIBILITA' NOMINALE TOLLERANZA DI CALIBRAZIONE	*NOMINAL SENSITIVITY* *SENSIVITY TOLERANCE*	2mV/V ≤ ±0.1%		
RESISTENZA DI INGRESSO RESISTENZA DI USCITA RESISTENZA DI ISOLAMENTO BILANCIAMENTO DI ZERO ALIMENTAZIONE DI RIFERIMENTO ALIMENTAZIONE NOMINALE ALIMENTAZIONE MAX.	*INPUT RESISTANCE* *OUTPUT RESISTANCE* *INSULATION RESISTANCE* *ZERO BALANCE* *RECOMENDED SUPPLY VOLTAGE* *NOMINAL SUPPLY VOLTAGE* *MAXIMUM SUPPLY VOLTAGE*	420 ± 20Ω 350 ± 2Ω > 5 GΩ ≤ ±1% 10 V 1-15 V 18 V		
VALORI MECCANICI LIMITE riferiti al carico nominale: a) carico minimo b) carico di servizio c) carico limite d) carico di rottura e) massimo carico trasversale f) carico dinamico limite FRECCIA MAX. AL CARICO NOMINALE	*MECHANICAL LIMIT values referred to nominal load:* *a) minimum load* *b) service load* *c) max permissible load* *d) breaking load* *e) max transverse load* *f) max permissible dynamic load* *DISPLACEMENT AT NOMINAL LOAD*	 0% 120% 150% >300% 100% 50% ~ 0.2 mm		
TEMPERATURA DI RIFERIMENTO CAMPO NOMINALE DI TEMPERATURA TEMPERATURA DI ESERCIZIO TEMPERATURA DI STOCCAGGIO	*REFERENCE TEMPERATURE* *TEMPERATURE NOMINAL RANGE* *SERVICE TEMPERATURE* *STORAGE TEMPERATURE*	+23°C -10/+40 °C -20/+70 °C -20/+80 °C		
PESO CLASSE DI PROTEZIONE (EN 60529) MATERIALE DELLA CELLA LUNGHEZZA CAVO	*WEIGHT* *PROTECTION CLASS (EN 60529)* *EXECUTION MATERIAL* *CABLE LENGTH*	~ 0.6 kg **IP68** *(100h at 1m water column)* **IP65** (25, 50 kg *silicon cover)* Acciaio Inox / *Stainless Steel* 5m	~ 1.2 kg	~ 2.6 kg
TESTE A SNODO SFERICO CONSIGLIATE	*RECOMMENDED KNUCKLE JOINTS*	DURBAL EM12 – EM 17 - EM20 - EM25		

Accelerazione di gravità g=9.80434 m/s² / *Acceleration of gravity g=9.80434 m/s²*

Plan de câblage des capteurs de la plaque galerie OPERA



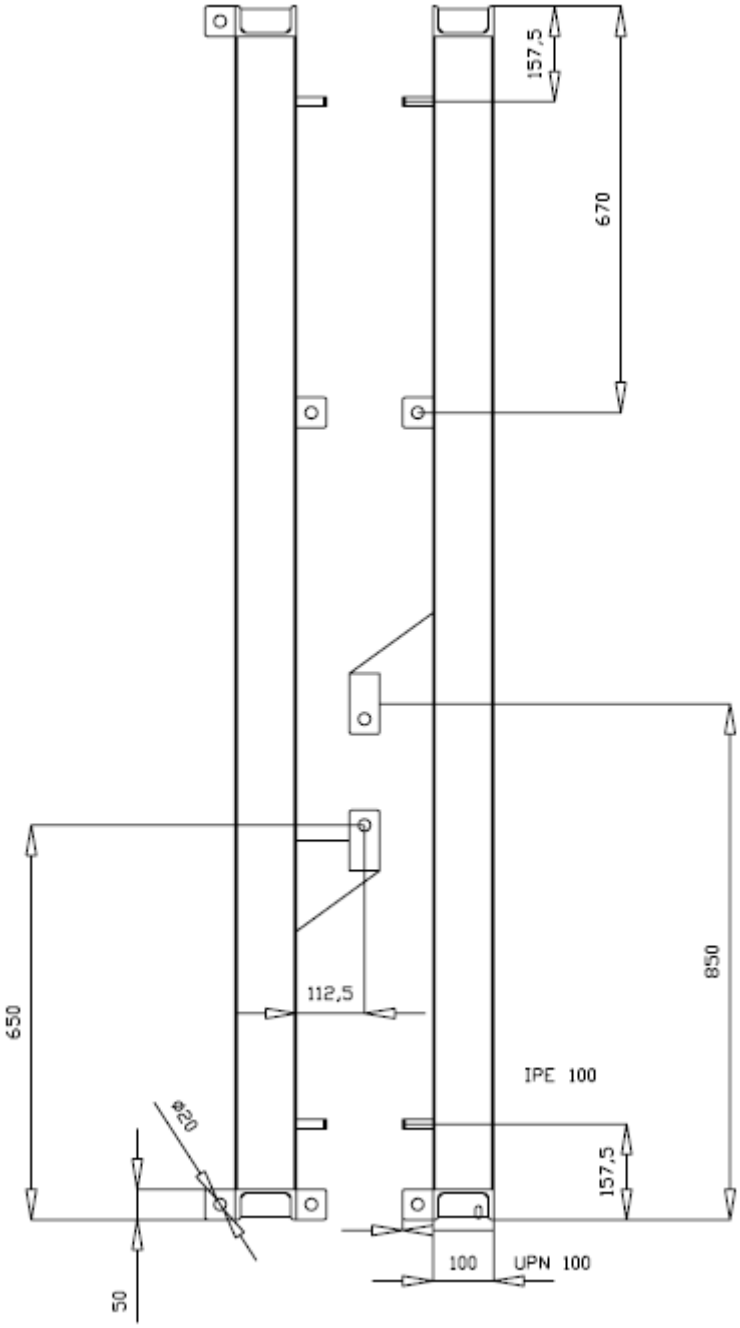


Figure II Dimension de deux bâtis.

Annexe III. Courbes de densité en aval du canal

1. Profil de densité en aval de la rupture pour les écoulements avec une ouverture initiale de porte de 20 cm

- A t=2,12 s.

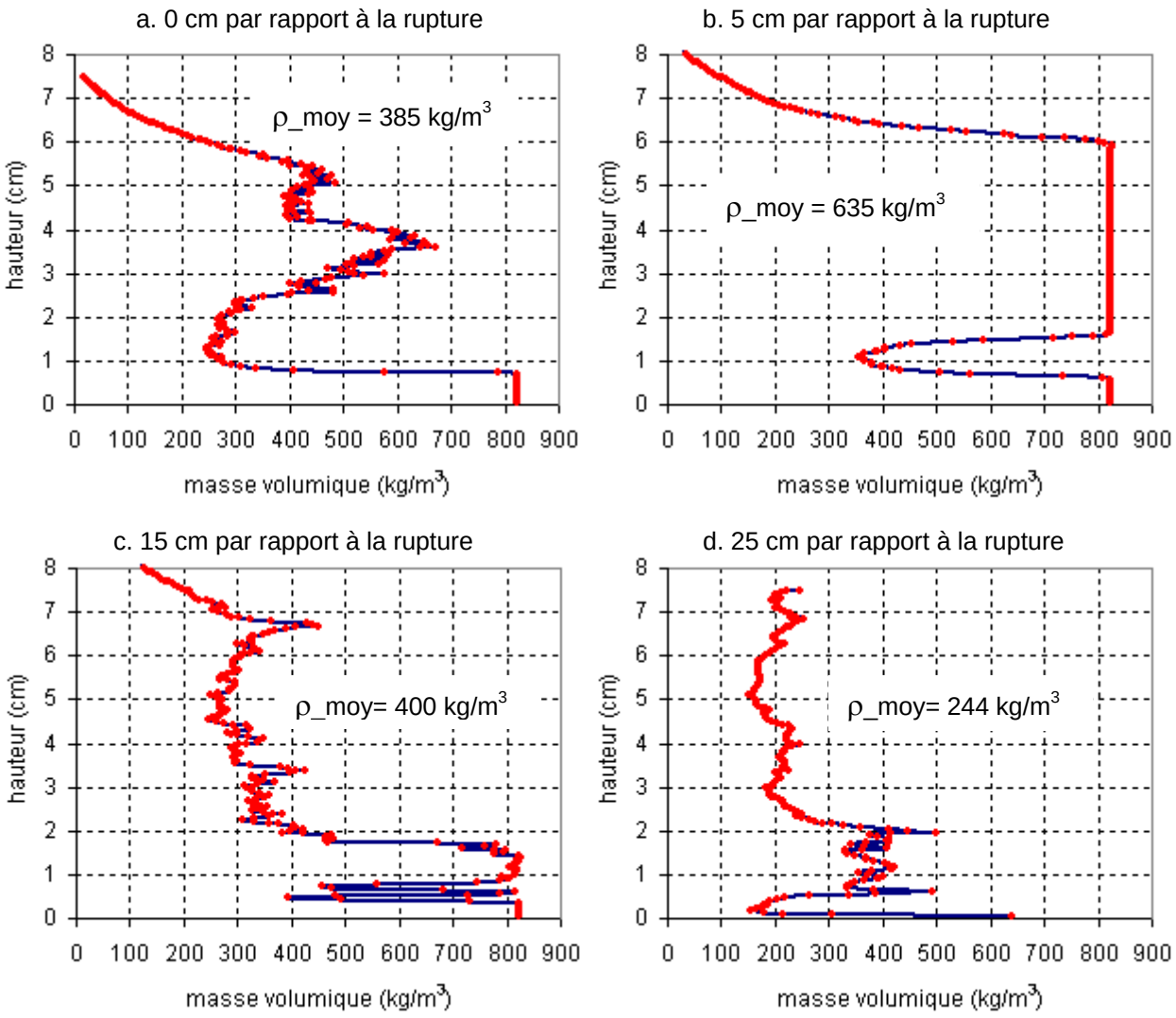


Figure III-1. Profil de densité à t=2,12s pour un écoulement avec une ouverture initiale à 20 cm. a. 0 cm b. 5 cm c. 15 cm d. 25 cm.

- A t= 4,12 s.

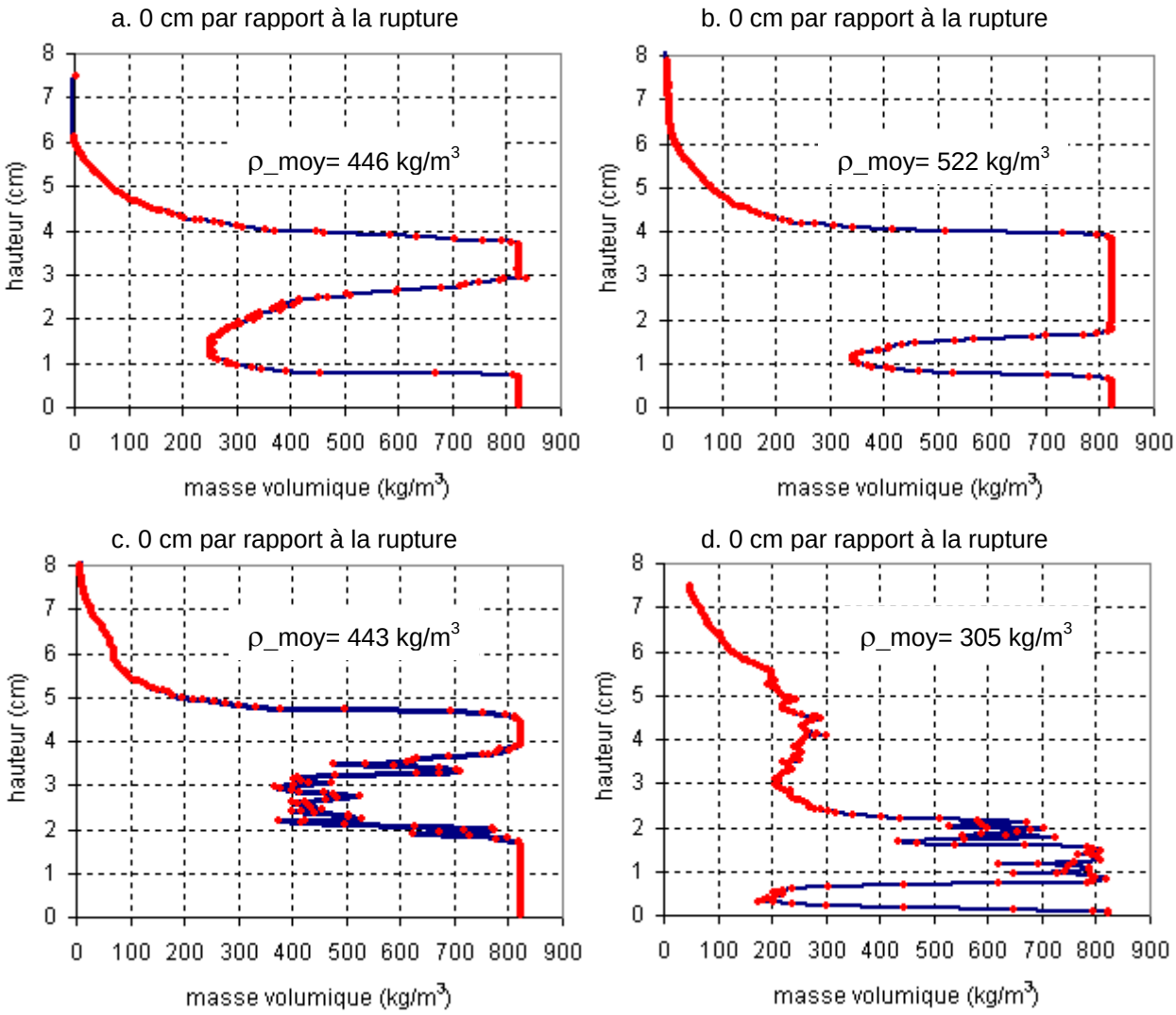


Figure III-2. Profil de densité à t=4,12s pour un écoulement avec une ouverture initiale à 20 cm. a. 0 cm b. 5 cm c. 15 cm d. 25 cm.

2. Profil de densité en aval de la rupture pour les écoulements avec une ouverture initiale de porte de 10 cm

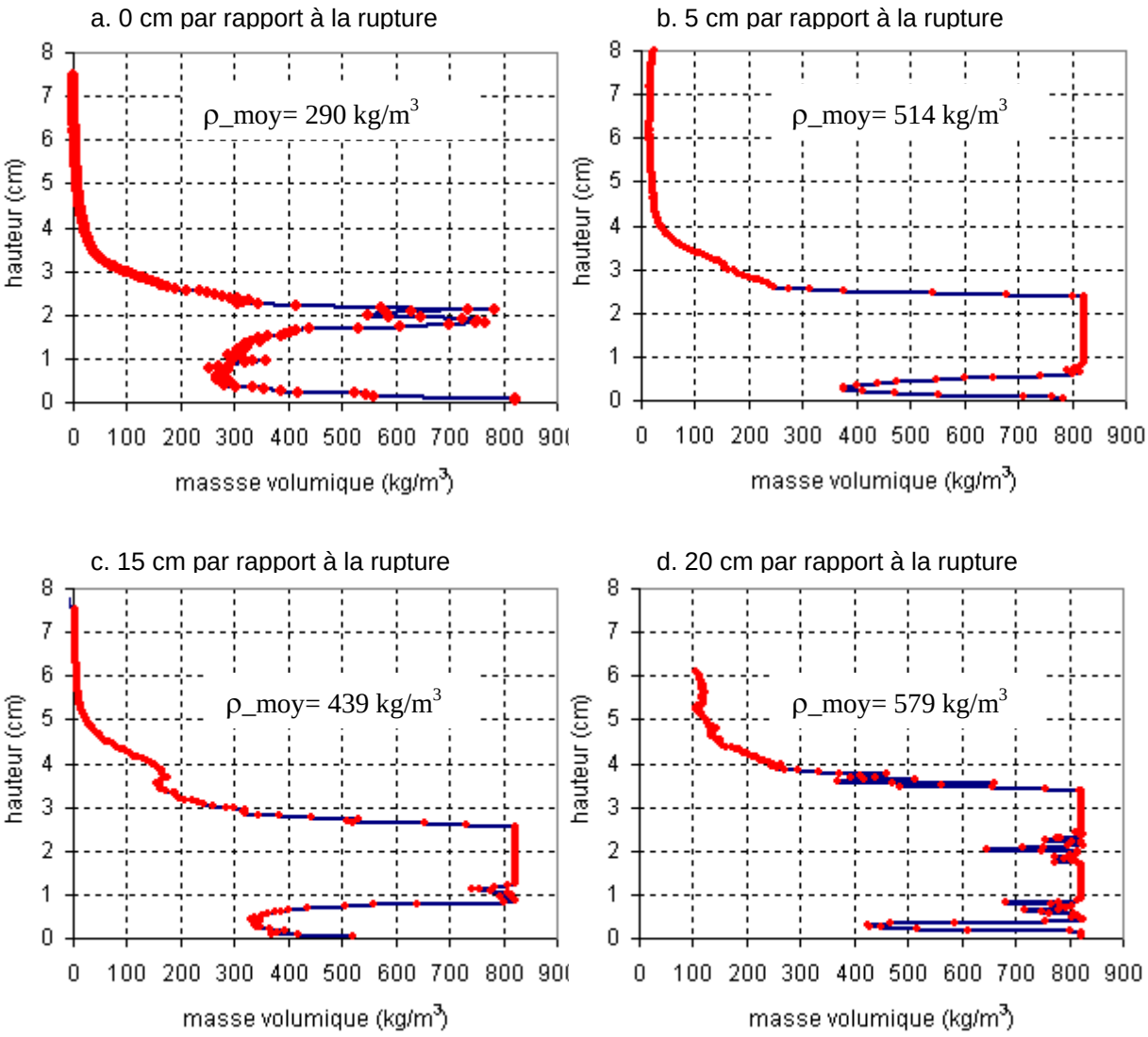


Figure III-3. Profil de densité à t=3 s pour un écoulement avec une ouverture initiale à 10 cm a. 0 cm b. 5 cm c. 15 cm d. 25 cm.

Annexe IV. Elément poutre de type Timoshenko

Les éléments multifibres du type de poutre Timoshenko ont été utilisés. La section d'élément peut être quelconque (hétérogène et non-symétrique) et l'élément est adapté à une évolution non linéaire du comportement des fibres.

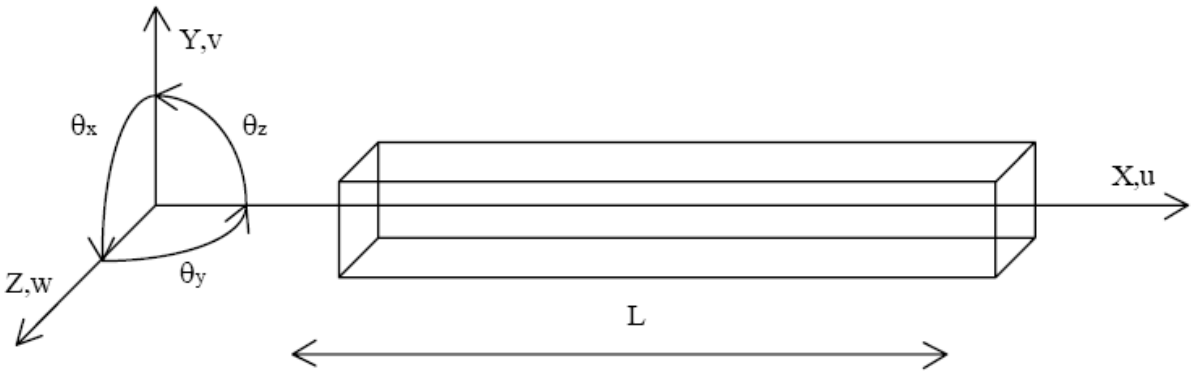


Figure IV-1. Poutre Timoshenko 3D

Pour une poutre droite 3D orientée selon la direction x et soumise aux efforts distribués q_y et q_z, les champs de déplacements et de déformations s'écrivent les suivants :

$$u(x,y,z) = u_s(x) - y\theta_{sz}(x) + z\theta_{sy}(x) \quad \text{(IV-1.a)}$$

$$v(x,y,z) = v_s(x) - z\theta_{sx}(x) \quad \text{(IV-1.b)}$$

$$w(x,y,z) = w_s(x) + y\theta_{sx}(x) \quad \text{(IV-1.c)}$$

$$\varepsilon_{xx} = u_s'(x) - y\theta_{sz}'(x) + z\theta_{sy}'(x) \quad \text{(IV-2.a)}$$

$$2\varepsilon_{xy} = v_s'(x) - \theta_{sz}'(x) - z\theta_{sx}'(x) \quad \text{(IV-2.b)}$$

$$2\varepsilon_{xy} = w_s'(x) + \theta_{sy}(x) + y\theta_{sx}(x) \quad \text{(IV-2.c)}$$

En introduisant les équations de déformation dans le principe des travaux virtuels, nous obtenons :

$$\int_{V_0} \left(\delta\varepsilon_{xx}\sigma_{xx} + 2\delta\varepsilon_{xy}\sigma_{xy} + 2\delta\varepsilon_{xz}\sigma_{xz}\right)dV_0 = \int_0^L \left(\delta v_s(x) q_y + \delta w_s(x) q_z\right)dx$$

$\Leftrightarrow$

$$\begin{aligned}&\int_0^L \left(N\delta u_s'(x) + T_y\delta\beta_{sy}(x) + T_z\delta\beta_{sz}(x) + M_x\delta\theta_{sx}'(x) + M_y\delta\theta_{sy}'(x) + M_z\delta\theta_{sz}'(x)\right)\\ &= \int_0^L \left(\delta v_s(x) q_y + \delta w_s(x) q_z\right)dx\end{aligned} \quad \text{(IV-3)}$$

avec N étant l'effort normal, T_y et T_z les efforts tranchants, M_y et M_z les moments de flexion, M_x le moment de torsion. Les définitions de ces paramètres sont les suivantes :

$$N = \int_S \sigma_{xx} dS \quad \text{(IV-4)}$$

$$T_y = \int_s \sigma_{xy} dS \text{ et } T_z = \int_s \sigma_{xz} dS \quad \text{(IV-5)}$$

$$M_y = \int_S z\sigma_{xx} dS \text{ et } M_z = -\int_S y\sigma_{xx} dS \quad \text{(IV-6)}$$

$$M_x = \int_S \left(-z\sigma_{xy} + y\sigma_{xz}\right)dS \quad \text{(IV-7)}$$

$\beta_{sy}(x) = v_s'(x) - \theta_{sz}(x)$; $\beta_{sz}(x) = w_s'(x) + \theta_{sy}(x)$

Selon la théorie de poutre et les équations d'élasticité, nous avons :

$$\sigma_{xx} = E\varepsilon_{xx} \ ; \ \sigma_{xy} = 2G\varepsilon_{xy} \ ; \ \sigma_{xz} = 2G\varepsilon_{xz} \ ; \ \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0 \qquad \text{(IV-8)}$$

où E le module d'Young et G le module de cisaillement.
La relation entre les contraintes généralisées F et les déformations généralisées D est donnée par [Guedes et al. 1994] comme la suivante :

$$F = K_s D \qquad \text{(IV-9.a)}$$

avec

$$F = (N, T_y, T_z, M_x, M_y, M_z)^T \qquad \text{(IV-9.b)}$$

$$D = \left(D_x, D_y, D_z, D_{rotx}, D_{roty}, D_{rotz}\right)^T = \left(u_s'(x), \beta_{sy}(x), \beta_{sz}(x), \theta_{sx}'(x), \theta_{sy}'(x), \theta_{sz}'(x)\right)^T \qquad \text{(IV-9.c)}$$

$$K_s = \begin{bmatrix} K_{s11} & 0 & 0 & 0 & K_{s15} & K_{s16} \\ & K_{s22} & 0 & K_{s24} & 0 & 0 \\ & & K_{s33} & K_{s34} & 0 & 0 \\ & & & K_{s44} & 0 & 0 \\ & & & & K_{s55} & K_{s56} \\ sym & & & & & K_{s66} \end{bmatrix} \qquad \text{(IV-9.d)}$$

$K_{s11} = \int_S E dS$; $K_{s15} = \int_S Ez dS$; $K_{s16} = -\int_S Ey dS$; $K_{s22} = k_y \int_S G dS$; $K_{s24} = -k_y \int_S Gz dS$;
$K_{s33} = k_z \int_S G dS$; $K_{s34} = k_z \int_S Gy dS$; $K_{s44} = \int_S G\left(k_z y^2 + k_y z^2\right) dS$; $K_{s55} = \int_S Ez^2 dS$;
$K_{s56} = -\int_S Eyz dS$; $K_{s66} = \int_S Ey^2 dS$;

ici, E et G varient en fonction de y et z. D'après le principe des travaux virtuels, nous avons :

$$\int_0^L \delta D^T K_s D dx - \int_0^L \delta v_s(x) q_y + \delta w_s(x) q_z dx = 0 \qquad \text{(IV-10)}$$

De plus, le principe du travail virtuel des efforts d'inertie [Guedes et al. 1994] nous donne :

$$W_{inert} = \int_0^L \int_S \rho \left(\delta u(x,y) \frac{d^2 u(x,y)}{dt^2} + \delta v(x,y) \frac{d^2 v(x,y)}{dt^2} + \delta w(x,y) \frac{d^2 w(x,y)}{dt^2} \right) dS dx$$
$$= \int_0^L \delta U M_s \frac{d^2 U}{dt^2} dx \qquad \text{(IV-11)}$$

avec U est le vecteur de déplacements généralisés, défini par

$$U = \left(u_s(x), v_s(x), w_s(x), \theta_{sx}(x), \theta_{sy}(x), \theta_{sz}(x)\right)$$

La matrice de masse s'écrit comme la suivante :

$$M_s = \begin{bmatrix} M_{s11} & 0 & 0 & 0 & M_{s15} & M_{s16} \\ & M_{s22} & 0 & M_{s24} & 0 & 0 \\ & & M_{s33} & M_{s34} & 0 & 0 \\ & & & M_{s44} & 0 & 0 \\ & & & & M_{s55} & M_{s56} \\ sym & & & & & M_{s66} \end{bmatrix} \qquad \text{(IV-12)}$$

$M_{s11} = \int_S \rho dS$; $M_{s15} = \int_S \rho z dS$; $M_{s16} = -\int_S \rho y dS$; $M_{s22} = k_y \int_S \rho dS$; $M_{s24} = -k_y \int_S \rho z dS$;
$M_{s33} = k_z \int_S \rho dS$; $M_{s34} = k_z \int_S \rho y dS$; $M_{s44} = \int_S \rho \left(k_z y^2 + k_y z^2 \right) dS$; $M_{s55} = \int_S \rho z^2 dS$;
$M_{s56} = -\int_S \rho y z dS$; $M_{s66} = \int_S \rho y^2 dS$;

avec ρ une variable qui est en fonction de y et z.
En utilisant les fonctions de forme d'ordre supérieur, la discrétisation des variables $u_s(x)$, $v_s(x)$, $w_s(x)$, $\theta_{sx}(x)$, $\theta_{sy}(x)$, $\theta_{sz}(x)$ peut s'écrit :

$$\begin{Bmatrix} u_s(x) \\ v_s(x) \\ w_s(x) \\ \theta_{sx}(x) \\ \theta_{sy}(x) \\ \theta_{sz}(x) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_3 & 0 & 0 & 0 & h_4 & 0 & h_5 & 0 & 0 & 0 & h_6 \\ 0 & 0 & h_3^* & 0 & -h_4^* & 0 & 0 & 0 & h_5^* & 0 & -h_6^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -h_7^* & 0 & h_8^* & 0 & 0 & 0 & -h_9^* & 0 & h_{10}^* & 0 \\ 0 & h_7 & 0 & 0 & 0 & h_8 & 0 & h_9 & 0 & 0 & 0 & h_{10} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ \theta_{z1} \\ u_2 \\ v_2 \\ w_2 \\ \theta_{x2} \\ \theta_{y2} \\ \theta_{z2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{axial} \\ H_{verty} \\ H_{vertz} \\ H_{rotx} \\ H_{roty} \\ H_{rotz} \end{bmatrix} \varphi$$

$$\begin{cases} h_1 = 1 - \dfrac{x}{L} \ ; \ h_2 = \dfrac{x}{L} \ ; \ h_3 = \dfrac{1}{1+\phi}\left\{ 2\left(\dfrac{x}{L}\right)^3 - 3\left(\dfrac{x}{L}\right)^2 - \phi\left(\dfrac{x}{L}\right) + 1 + \phi \right\} \ ; \\ h_4 = \dfrac{L}{1+\phi}\left\{ \left(\dfrac{x}{L}\right)^3 - \left(2 + \dfrac{\phi}{2}\right)\left(\dfrac{x}{L}\right)^2 + \left(1 + \dfrac{\phi}{2}\right)\left(\dfrac{x}{L}\right) \right\} \ ; \ h_5 = -\dfrac{1}{1+\phi}\left\{ 2\left(\dfrac{x}{L}\right)^3 - 3\left(\dfrac{x}{L}\right)^2 - \phi\left(\dfrac{x}{L}\right) \right\} \ ; \\ h_6 = \dfrac{L}{1+\phi}\left\{ \left(\dfrac{x}{L}\right)^3 - \left(1 - \dfrac{\phi}{2}\right)\left(\dfrac{x}{L}\right)^2 - \dfrac{\phi}{2}\left(\dfrac{x}{L}\right) \right\} \ ; \ h_7 = \dfrac{6}{(1+\phi)L}\left\{ \left(\dfrac{x}{L}\right)^2 - \left(\dfrac{x}{L}\right) \right\} \ ; \\ h_8 = \dfrac{1}{1+\phi}\left\{ 3\left(\dfrac{x}{L}\right)^2 - (4+\phi)\left(\dfrac{x}{L}\right) + (1+\phi) \right\} \ ; \ h_9 = -\dfrac{6}{(1+\phi)L}\left\{ \left(\dfrac{x}{L}\right)^2 - \left(\dfrac{x}{L}\right) \right\} \ ; \\ h_{10} = \dfrac{1}{(1+\phi)}\left\{ 3\left(\dfrac{x}{L}\right)^2 - (2-\phi)\left(\dfrac{x}{L}\right) \right\} \ ; \end{cases}$$

Avec $\phi = \phi_y = \dfrac{12\int_s Ey^2 ds}{L_2 k_y \int_s Gds}$. Pour h_i^* avec i=(3,10), $\phi = \phi_z = \dfrac{12\int_s Ez^2 ds}{L_2 k_z \int_s Gds}$.

Les déformations généralisées deviennent : $\varepsilon = B\varphi$ (IV-13)

Avec :

$$\varepsilon_x = u_s'(x) = H'_{axial}\varphi = B_{axial}\varphi \quad \text{(IV-13.a)}$$

$$\varepsilon_y = v_s'(x) - \theta_{sz}(x) = \left(H'_{verty} - H_{rotz}\right)\varphi = B_{verty}\varphi \quad \text{(IV-13.b)}$$

$$\varepsilon_z = w_s'(x) + \theta_{sy}(x) = \left(H'_{vertz} + H_{roty}\right)\varphi = B_{vertz}\varphi \quad \text{(IV-13.c)}$$

$$\varepsilon_{rotx} = \theta'_{sx}(x) = H'_{rotx}\varphi = B_{rotx}\varphi \quad \text{(IV-13.d)}$$

$$\varepsilon_{roty} = \theta'_{sy}(x) = H'_{roty}\varphi = B_{roty}\varphi \quad \text{(IV-13.e)}$$

$$\varepsilon_{rotz} = \theta'_{sz}(x) = H'_{rotz}\varphi = B_{rotz}\varphi \quad \text{(IV-13.f)}$$

Après une discrétisation des éléments dans l'espace [0, L] et une utilisation des équations précédentes IV-13, l'équation IV-3 est équivalente à une résolution d'un système linéaire.

$$K\varphi = F$$

Nous obtenons afin les matrices de rigidité, de masse et le vecteur des efforts :

$$K_{elem} = \int_0^L B^T K_s B dx \quad \text{(IV-14)}$$

$$M_{elem} = \int_0^L H^T M_s H dx \quad \text{(IV-15)}$$

$$F = \int_0^L (H_{verty}^T q_y + H_{vertz}^T q_z) dx \quad \text{(IV-16)}$$

Annexe V. Plan de la galerie de Montaulever

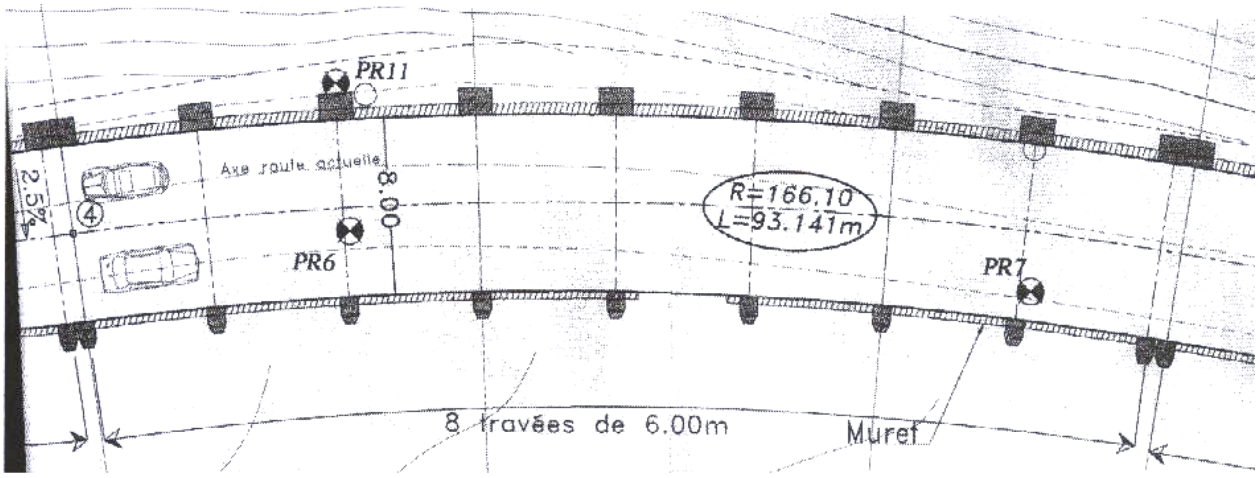


Figure V-1. Vue en plan.

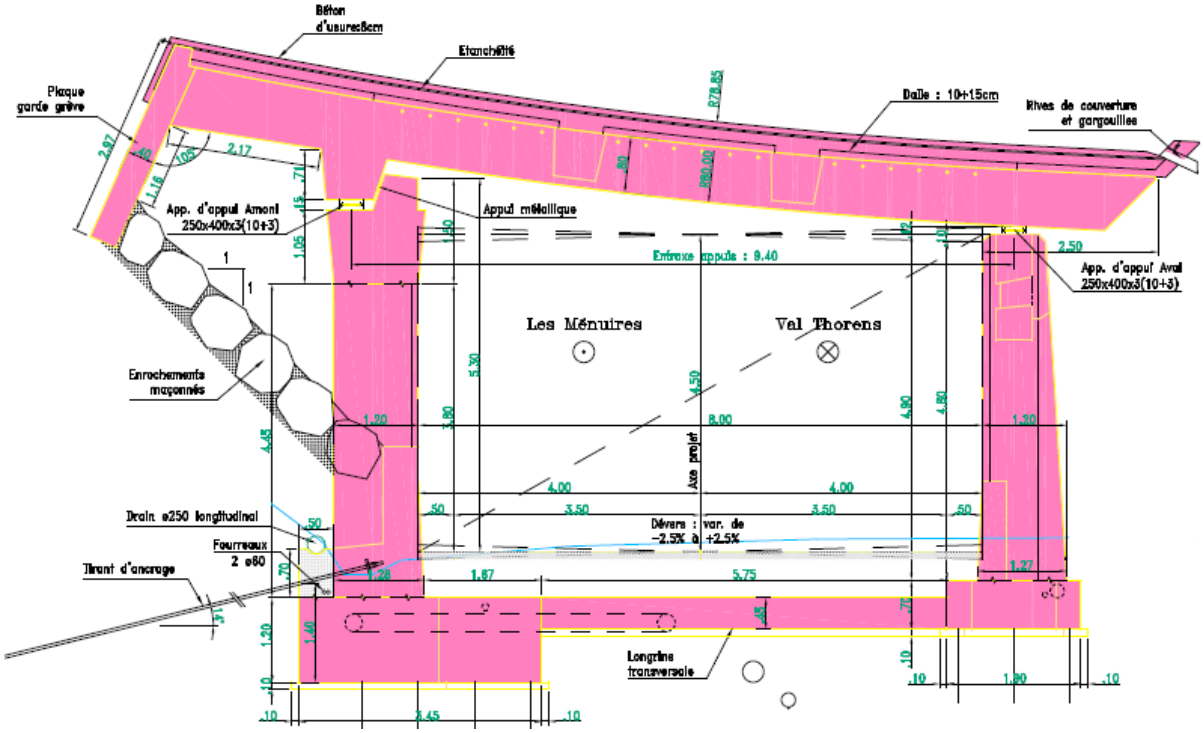


Figure V-2. Coupe de la galerie.

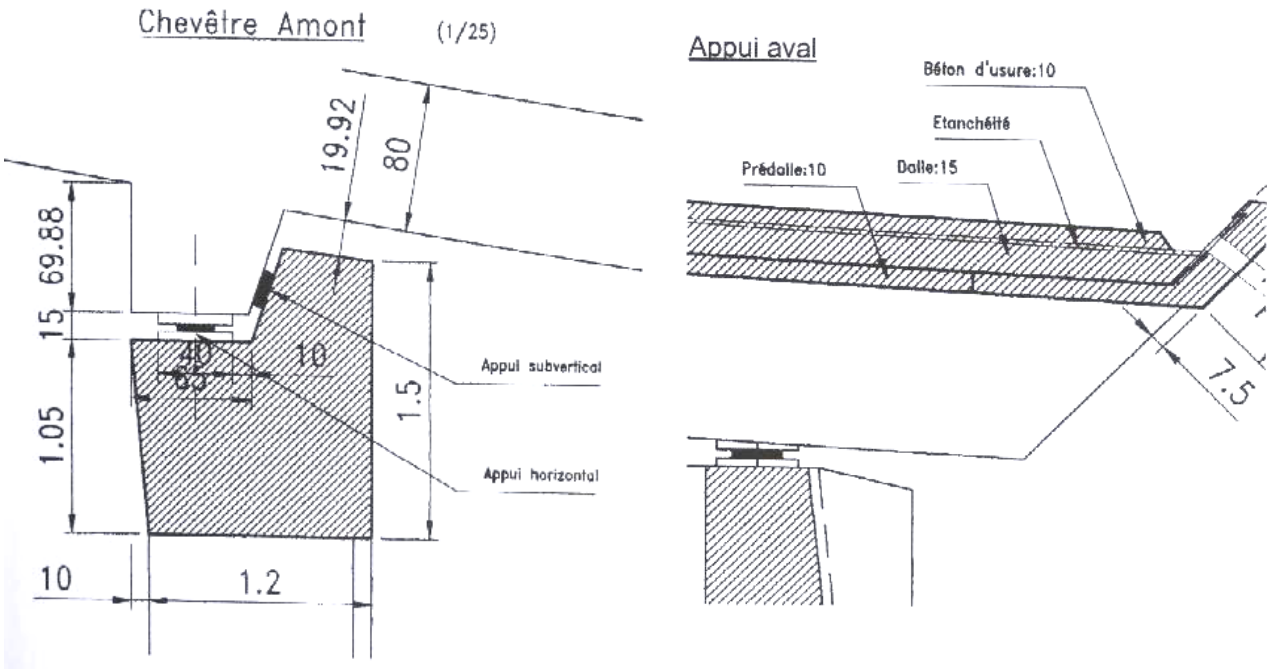


Figure V-3. Les appuis