

		
<p>Objectif coopération territoriale européenne Programme Italie-France (Alpes) 2007/2013 Alcotra</p>	<p>REGION AUTONOME VALLEE D'AOSTE Structure de l'aménagement hydrogéologique et des bassins de montagne Loc. Amérique, 33 11020 Quart</p>	<p>IRSTEA 2, Rue de la Papeterie BP 76 38402 - Saint-Martin-d'Hères</p>

INTERREG Cooperazione Italia-Francia 2007-13

## Progetto n° 144 - MAP<sup>3</sup>

### " Monitoring for Avalanche Prevision, Prediction and Protection "

## Rapport Technique FINAL

### PARTENAIRES ET COUTS DU PROJET

<i>Projet n 144</i>	Monitoring for Avalanche Prevision, Prediction and Protection - MAP <sup>3</sup>		
<i>Budget</i>	<u>Budget total</u> 1.644.431,00	<u>RAVA</u> 1.073.696,00	<u>IRSTEA</u> 570.735,00
<i>Partenariat</i>	<u>Chef de file :</u>  Structure de l'aménagement hydrogéologique et des bassins de montagne Région Autonome Vallée d'Aoste		<u>Partenaire transfrontalier :</u>  IRSTEA Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture

# SOMMAIRE

---

INTRODUCTION .....	3
Objectifs du projet.....	3
Rappel des étapes principales .....	6
ACTIVITES REALISEES AU COURS DU PROJET .....	7
<b>ACTION 1</b> : <b>Suivi des processus de déclenchement à échelle locale et régionale</b> ....	7
A1.1 Boîte de cisaillement .....	7
A1.2 Carottier.....	9
A1.3 Comportement des couches fragiles.....	10
A1.4 Expérimentations GPR (Ground Penetrating Radar) préliminaires dans le cadre de l'étude de faisabilité d'un système de suivi des modifications de la structure verticale du manteau neigeux .....	10
A1.5 Evaluation du transport de la neige par le vent .....	11
P.te Seehore.....	11
Col du Lac Blanc.....	14
A1.6 Mise à jour automatique du cadastre régional (AdHoc4MAP3).....	19
A1.7 Détection automatique du déclenchement des avalanches (array infrasonique).....	21
<b>ACTION 2</b> : <b>Validation et calibration spatio-temporelle des modèles de propagation du flux avalancheux</b> .....	27
A2.1 Site de la P.te Seehore .....	27
A2.2 Site du Lautaret .....	30
A2.3 Cas particulier des avalanches de neige poudreuse.....	47
<b>ACTION 3</b> : <b>Protection passive</b> .....	48
A3-1 Obstacle sur le site de P.te Seehore .....	48
A3-2 Tas freineur sur le site de Tacconnaz .....	64
A3-3 Modélisation physique de l'interaction écoulement/obstacle .....	66
<b>ACTION 4</b> : <b>Valorisation des résultats et divulgation</b> .....	69
<b>ACTION 5</b> : <b>Coordination des activités</b> .....	75
BILAN FINAL ET PERSPECTIVES FUTURES .....	77
ANNEXES .....	78

# INTRODUCTION

Le projet de Coopération Italie-France (Alpes) Alcotra 2007-2013 n 144 « **Monitoring for Avalanche Prevision, Prediction and Protection – MAP<sup>3</sup>** » a été approuvé par le Comité de Suivi du 21.06.2011 à Imperia. Le démarrage effectif du projet a été fixé au 07.11.2011.

## Objectifs du projet

- A. Réalisation d'un outil de suivi des avalanches, en temps réel, en support à la prévision du risque d'avalanche diffusée à travers le Bulletin d'Avalanches
- B. Définition des processus et des mécanismes de départ d'avalanche et des volumes associés en introduisant le transport de neige par le vent et en développant et/ou testant de nouveaux instruments de mesures
- C. Amélioration des sites pilotes avalancheux présents dans la zone transfrontalière, afin de déterminer les paramètres caractéristiques utilisés pour la modélisation de la dynamique des avalanches.
- D. Amélioration des modèles actuels de propagation des avalanches (dynamique et interaction écoulement-obstacles), à travers l'étude de cas réels.
- E. Amélioration du dimensionnement des protections paravalanches passives (type digues)
- F. Suivi d'un site à fort enjeu d'un site à risque d'avalanche : Tacconnaz.

<b>Budget total du projet</b> <b>1 644 431 €uros</b>	Budget des partenaires italiens 1 073 696 €uros 65,3%	Budget des partenaires français 570 735 €uros 34,7%
---	---	---

**Durée du projet : 3 ans (Aout 2011 – Aout 2014 – Prorogation octobre 2014)**

Ce projet se décompose en 5 actions décrites dans le tableau ci-après.

Activités du projet		
N°	Activités	Description synthétique
1	Suivi des processus de déclenchement à échelle locale et régionale	A l'échelle locale, le suivi des processus de déclenchement sera réalisé in situ grâce à des méthodes de mesures novatrices (stéréophotogrammétrie à haute fréquence, Ground penetrating radar, boîte de cisaillement, laser-scan). Toutes ces données expérimentales serviront à alimenter des modèles mécaniques de déclenchement dans lesquels l'effet du transport de neige par le vent et des accumulations créées sera introduit. A l'échelle régionale, un dispositif de surveillance et de suivi des déclenchements par array infrasoniques sera testé pour permettre de localiser, en remote sensing, les couloirs dans lesquels un déclenchement d'avalanche s'est effectivement produit, pour l'amélioration de la prévision du risque avalanches.

2	Validation et calibration spatio-temporelle des modèles de propagation du flux avalancheux.	La modélisation numérique des avalanches nécessite la spécification de nombreux paramètres qui restent mal connus : taux d'érosion, forme des profils verticaux de vitesse, paramètres de frottement, etc. Les sites expérimentaux français et italiens (Taconnaz, Lautaret et Seehore), dont l'instrumentation sera renforcée, permettront de fournir ces données. Les dépôts et l'érosion seront étudiés par laser-scan et photogrammétrie. Le projet prévoit également le développement de méthodes de traitement spécifique de l'ensemble de ces données.
3	Protection passive	L'équipement des sites du Col du Lautaret et de P.te Seehore et les mesures associées seront poursuivies pour permettre d'acquérir de nouvelles données relatives aux pressions d'impact sur les obstacles et aux dépôts en aval des obstacles. Le projet prévoit d'analyser et interpréter l'ensemble des mesures acquises in situ par des approches théoriques complémentaires combinant simulations numériques et tests de laboratoire en modèle réduit pour proposer à terme des méthodes de dimensionnement des ouvrages de protection passive opérationnelles à la fois sur les aspects structurel et fonctionnel. Le couloir de Taconnaz, plus grand couloir avalancheux à fort enjeu équipé d'un dispositif paravalanche complexe, sera surveillé grâce au maintien du niveau de qualité des capteurs et centrales de mesures déjà en place et à la rétro-analyse des événements avalancheux.
4	Valorisation des résultats et divulgation	Ce projet simple prévoit deux journées de divulgation. La première sera dédiée à la présentation des résultats de projet, la deuxième contribuera à la formation des professionnels et des gestionnaires du risque avalanches. Les résultats scientifiques seront présentés lors de conférences internationales et par la publication d'articles dans des revues internationales. Il est prévu la publication d'un ouvrage grand public Risques naturels en montagne en français aux éditions Quae dont une partie est consacrée aux avalanches. Les résultats et les documents du projet seront insérés sur le site du projet stratégique RISK NAT
5	Coordination du projet	Il est prévu de créer un comité de pilotage constitué d'un ou plusieurs responsables de chaque partenaire territorial afin de gérer le projet au niveau logistique et technique.

Plus en détail, dans le développement du projet seront réalisées les activités ci-dessous :

### 1. Suivi des processus de déclenchement à échelle locale et régionale

A l'échelle locale, un suivi spatio-temporel de la rupture et de la déstabilisation du manteau neigeux dans le couloir Nord-Est du site français du Col du Lautaret sera mis en place par prise de vue par caméra rapide, couplée à l'acquisition préalable d'un modèle numérique de terrain du site enneigé par stéréophotogrammétrie permettant de suivre à haute fréquence le développement et la propagation de la fracture. Une étude de faisabilité de l'utilisation du GPR (ground penetrating radar : GPR) pour acquisition à haute fréquence des modifications la structure verticale du manteau neigeux sera également réalisé. Cependant il sera, à ce stade, effectué sur le site du Col du Lac Blanc à petite échelle mais dans des conditions de pente et de neige comparables à celles du Col du Lautaret. Le Col du Lac Blanc permettra également de tester in situ le modèle numérique NEMO de transport de neige. Toutes ces données expérimentales serviront à alimenter des modèles mécaniques de déclenchement dans lesquels l'effet du transport de neige par le vent et des accumulations créées sera introduit.

A l'échelle régionale, un dispositif de surveillance et de suivi des déclenchements par array infrasoniques sera testé dans la vallée d'Aoste pour permettre de localiser les couloirs dans lesquels un déclenchement d'avalanche s'est effectivement produit.

## 2. Validation et calibration spatio-temporelle des modèles de propagation du flux avalancheux.

La modélisation numérique des avalanches nécessite la spécification de nombreux paramètres qui restent mal connus: taux d'érosion, forme des profils verticaux de vitesse, paramètres de frottement, etc. Sur le couloir du Lautaret, l'acquisition de données expérimentales démarrée dans le cadre de DynAval et permettant de caractériser l'écoulement avec une résolution spatio-temporelle très fine sera poursuivie. Pour ce faire, les données acquises en quelques points durant la durée de l'écoulement grâce à des capteurs seront complétées par une détermination des volumes de départ, de la reprise et de la densification du dépôt grâce à l'utilisation de l'outil photogrammétrique qui offre une vision spatiale bien plus complète.

Le projet prévoit le développement de méthodes de traitement de l'ensemble de ces données pour améliorer la connaissance des écoulements avalancheux, évaluer la qualité des modèles numériques existant dans différentes conditions bien contrôlées et y intégrer les connaissances nouvelles développées. L'une des originalités du projet est de ne pas séparer la partie analyse des données de la partie modélisation, mais au contraire de procéder à l'analyse des données via les modèles d'écoulement grâce au développement d'algorithmes de calibration nouveaux. L'intérêt est de quantifier les paramètres non mesurables indépendamment du modèle mais nécessaires à la simulation d'avalanche tel les différents composants de la loi de frottement.

## 3. Protection passive

L'équipement des sites du Col du Lautaret et de P.te Seehore et les mesures associées seront poursuivies pour permettre d'acquérir de nouvelles données relatives à la dynamique des avalanches incidentes, aux pressions d'impact sur les obstacles et aux dépôts en aval des obstacles. Le couloir de Taconnaz, plus grand couloir avalancheux à fort enjeu équipé d'un dispositif paravalanche complexe, sera surveillé grâce au maintien du niveau de qualité des capteurs et centrales de mesures déjà en place (installées dans le cadre de DynAval). Les avalanches générées seront rétro-analysées (relevé lidar de la zone de dépôt) afin d'évaluer le dispositif paravalanche dont la construction s'achève et améliorer la connaissance du fonctionnement des protections paravalanches passives à grande échelle.

Le projet prévoit d'analyser et interpréter l'ensemble des mesures sur les avalanches déclenchées (Lautaret, P.te Seehore) et naturelles (Taconnaz) par des approches théoriques complémentaires combinant simulations numériques et tests de laboratoire en modèle réduit. Ces approches sont déjà opérationnelles sur des obstacles modèles. On s'attachera ici à porter l'effort sur des obstacles en parfaite similitude géométrique avec ceux des sites expérimentaux (plaque au Lautaret et au P.te Seehore et tas freineur à Taconnaz). L'objectif est de caractériser la force exercée sur l'obstacle (signal temporel de pression moyenne, fluctuations temporelles et distribution spatiale de la force sur la surface de l'obstacle sollicitée), l'influence de l'obstacle sur les dépôts à l'aval ainsi que le lien pouvant exister entre les forces mesurées sur l'obstacle et les effets de ce dernier en aval. L'intérêt de ce dernier point est original car il permet de proposer à terme des méthodes de dimensionnement des ouvrages de protection passive opérationnelles à la fois sur les aspects structurel et fonctionnel. La vulnérabilité physique des obstacles et plus particulièrement du bâti pourra être étudié.

## Rappel des étapes principales

DATE	EVENEMENT
<u>11 aout 2011</u>	Date de réception de la lettre de notification d'approbation du projet
<u>07 novembre 2011</u>	Démarrage effectif du projet
<u>07 novembre 2011</u>	1 <sup>ère</sup> réunion de projet (Courmayeur - FMS)
<u>16 avril 2012</u>	Visite des partenaires techniques italiens sur le site du Col du Lac Blanc
<u>05 novembre 2012</u>	2 <sup>ème</sup> réunion de projet (Grenoble - IRSTEA)
<u>01 juillet 2013</u>	3 <sup>ème</sup> réunion de projet (Quart-RAVA)
<u>07-11 octobre 2013</u>	ISSW 2013 à Grenoble, organisé par IRSTEA/METEO FRANCE
<u>12 octobre 2013</u>	4 <sup>ème</sup> réunion de projet (Grenoble - IRSTEA)
<u>08 juillet 2014</u>	5 <sup>ème</sup> réunion de projet (Quart - RAVA)
<u>08-09 octobre 2014</u>	Réunion finale du projet (Grenoble - IRSTEA)
<b>10 octobre 2014</b>	Date d'achèvement du projet (prorogation accordée le 05/05/2014)

# ACTIVITES REALISEES AU COURS DU PROJET

## **ACTION 1**: Suivi des processus de déclenchement à échelle locale et régionale

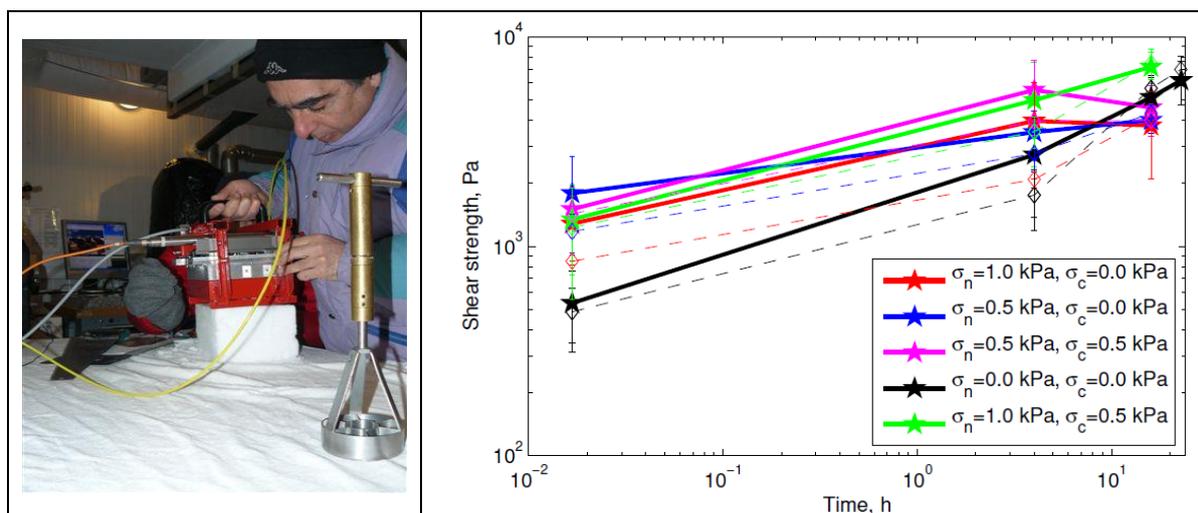
La Région Vallée d'Aoste, pour le déroulement des activités a mandaté l'Université de Turin - NatRisk, le Polytechnique de Torino - DISEG, la Fondazione Montagna Sicura - Ufficio neve e valanghe de Courmayeur, l'Université de Florence, la Société AdHoc 3Dsolutions srl de Gressan et la Société Item de Florence.

Trois sites ont été choisis pour le développement des activités: le site de la P.ta Seehore à Gressoney La Trinité, le site de Menthieu à Valgrisenche et le site de Crammont à Pré Saint Didier.

### **A1.1 Boîte de cisaillement**

La boîte de cisaillement a été testée sur différents types d'échantillons de neige dans le cadre d'une collaboration entre le Politecnico de Turin (F. Barpi, O. Pallara, M. Barbero, B. Frigo), IRSTEA (E. Polodskiy, G. Chambon) et Météo France/CEN (J. Roulle).

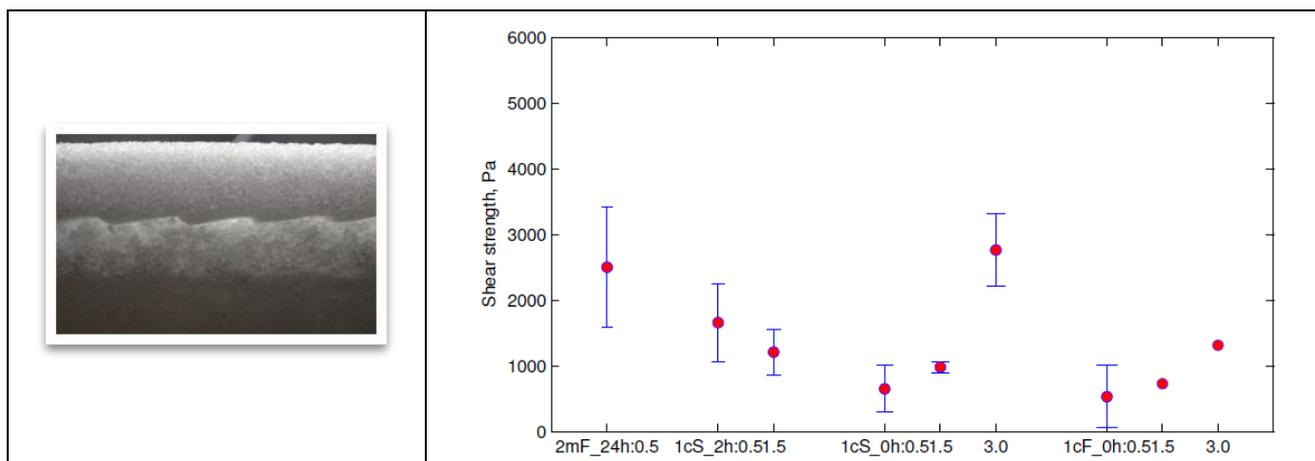
Les premiers tests ont été réalisés en février et mai 2013 dans la chambre froide du CEN. Ces tests ont d'abord permis de valider et d'éprouver le fonctionnement du dispositif. Les expériences se sont ensuite concentrées sur la mesure de la réponse en cisaillement d'interfaces artificielles entre deux blocs de neige. Le temps de contact entre les blocs avant le début des essais, ainsi que la charge normale appliquée sur l'interface, ont été variés. En tout, presque 80 essais ont été réalisés (Podolskiy et al., 2013a and Podolskiy et al., 2013b). En parallèle, les propriétés (densité, surface spécifique) de la neige ont été mesurées en collaboration avec C. Carmagnola (CEN). L'analyse et l'interprétation des données obtenues ont mis en évidence une augmentation très importante de la résistance mécanique des interfaces avec le temps, du fait d'un phénomène de frittage, ainsi qu'une influence de la contrainte normale. Ces travaux ont donné lieu à une publication commune IRSTEA/Politecnico de Turin dans *The Cryosphere* (Podolskiy et al., 2014a).



Mise en place d'un échantillon dans la boîte de cisaillement (gauche ; on distingue l'interface au milieu de l'échantillon) et augmentation de la résistance mécanique des interfaces avec le temps de frittage pour différentes contraintes normales appliquées (droite) (d'après Podolskiy et al., 2014a).

À la suite de ces essais, une réunion commune a été organisée à l'Institut Polytechnique de Turin le 24 juillet 2013 afin de discuter des améliorations possibles de l'instrument et de prévoir la prochaine campagne d'expériences (hiver 2013-2014). Il a notamment été décidé de réaliser une fenêtre d'observation sur le côté de la cellule de cisaillement afin de pouvoir suivre la déformation des échantillons durant les expériences.

Deux autres campagnes d'essais ont été conduites en février et mai 2014, toujours dans la chambre froide du CEN. Les expériences ont consisté cette fois à cisailier des échantillons de type « sandwich » constitués d'une couche de neige de faible cohésion (gobelets) de 2 mm ou 10mm d'épaisseur entourée de deux blocs de neige cohésive (grains fins). Pour éviter que la déformation ne se localise à l'interface entre les couches, certains essais ont été réalisés en usinant une rugosité de type dents de scie sur les blocs cohésifs. Les déplacements sur la surface latérale de l'échantillon ont été suivis grâce à une caméra rapide et à la mise en œuvre de PIV (Particle Imaging Velocimetry). En tout, 60 essais ont été réalisés. Les mesures de déplacements locaux ont permis de montrer que la rupture se localisait clairement dans la couche faible. Les valeurs de résistance mécanique mesurées sont comprises dans la gamme 0.5-3 kPa, en bon accord avec les données de la littérature pour les couches faibles. De plus, une augmentation nette de la résistance au cisaillement avec la contrainte normale appliquée, d'autant plus marquée que l'épaisseur de la couche faible est fine, a pu être mise en évidence. Cet effet de la contrainte normale apparaît consistant avec une enveloppe de rupture de type Mohr-Coulomb. L'analyse et l'interprétation des résultats de ces essais est toujours en cours, et une publication est en préparation.



Vue de côté de la couche faible au milieu des échantillons de type sandwich (gauche ; on remarque la rugosité des blocs en dents de scie) et valeurs de la résistance au cisaillement pour les différentes conditions expérimentales étudiées (droite).

Enfin, des premiers essais sur le terrain ont été réalisés au col du Lautaret en mars 2014. Malheureusement, le manteau neigeux était déjà fortement humidifié et ne présentait pas de couche fragile bien identifiée. Ces expériences ont toutefois permis de démontrer la faisabilité de tels essais mécaniques sur le terrain, dans des conditions proches de celles du laboratoire.

Ces différents résultats ouvrent des perspectives très prometteuses pour la caractérisation du comportement mécanique des couches de neige de faible cohésion, qui sont impliquées dans le déclenchement des avalanches de plaque (« couches fragiles »). La collaboration initiée entre IRSTEA et le Politecnico de Turin devra être poursuivie. Les derniers essais ont notamment montré l'intérêt qu'il y aurait à modifier le mode de pilotage de l'instrument, en passant d'un système à contrainte contrôlée à un système à déplacement contrôlé, afin de pouvoir suivre le comportement post-rupture de l'échantillon.

## A1.2 Carottier

Le 19 mars 2013, au site de la P.te Seehore, des tests avec le carottier de neige ont été réalisés dans la zone du dépôt, suite au déclenchement d'une avalanche.

Des échantillons de neige ont été extraits du dépôt de l'avalanche afin de tester le fonctionnement du système d'extraction des échantillons par le carottier. Des nouvelles procédures d'extraction ont été évaluées afin de rendre les opérations les plus simples possibles et de limiter la rupture de l'échantillon. Des confrontations ont été réalisées entre la densité des différents échantillons.



*Collecte des échantillons dans la zone du dépôt de l'avalanche du 19.03.2013*

Le 18 mars 2014, en occasion de la campagne de mesure avec la boîte de cisaillement, des tests ont été réalisés avec le carottier. Les tests ont démontré que la collecte des échantillons de neige dans le carottier ne modifie pas les caractéristiques de la neige. Une fois pris l'échantillon, le carottier a été utilisé pour le transport de la carotte de neige dans la boîte de cisaillement en la protégeant des rayons solaires. Le carottier a permis d'accélérer les opérations de collecte des échantillons. En outre, il est possible d'avoir plus de neige pour les tests et de choisir le matériel plus approprié pour faire les tests. Un adaptateur au carottier pour permettre d'insérer la carotte dans la boîte de cisaillement a été réalisé.

En avril 2014, cet adaptateur a été amélioré. L'adaptateur a été réalisé en bois.



*Adaptateur en bois pour la récolte des échantillons*

### **A1.3 Comportement des couches fragiles**

Le projet MAP3 a contribué au financement des travaux d'un post-doctorant, Evgeny Podolskiy, dont l'activité a été centrée sur l'étude du comportement des couches fragiles. La modélisation par éléments finis a été utilisée ici pour étudier le comportement mécanique d'un manteau stratifié sous sollicitation cyclique à très fort taux d'accélération avec une amplitude croissante de la contrainte jusqu'à la fracture. Le modèle proposé utilise le code Cast3M. Il considère la couche fragile comme une interface dont les propriétés mécaniques sont variées. La validation de la modélisation est réalisée grâce à la comparaison à des résultats expérimentaux précédemment obtenus par E. Podolovskiï lors de sa thèse (étude sur table vibrante de la réponse dynamique de la couche fragile d'un échantillon de neige en chambre froide).

Les résultats montrent que : (i) une loi de comportement sans résistance à la traction n'est pas capable de reproduire les expérimentations, du fait de la complexité de l'évolution de la contrainte et du déplacement à l'intérieur des échantillons, et (ii) le critère de rupture de Mohr-Coulomb permet de reproduire de manière satisfaisante les résultats expérimentaux, ce qui met en évidence l'influence de la contrainte normale sur la rupture des couches de neige de faible cohésion. Ces résultats ont donné lieu à une publication dans *Natural Hazards & Earth System Sciences Discussions* (Podolskiy et al., 2014b), et sont actuellement en cours de révision pour être publiés dans *Natural Hazards & Earth System Sciences*.

### **A1.4 Expérimentations GPR (Ground Penetrating Radar) préliminaires dans le cadre de l'étude de faisabilité d'un système de suivi des modifications de la structure verticale du manteau neigeux**

Suite à une première étude de faisabilité basée sur des recherches bibliographiques, des expérimentations préliminaires ont été réalisées. La première le 18 décembre 2013 au col de Porte à visée à prendre en main le matériel et essayer d'imager la stratigraphie du manteau neigeux. La deuxième campagne d'essais s'est déroulée au col du Lac Blanc en février 2014. Plusieurs tests de stabilité du manteau neigeux ont été suivis à l'aide du système GPR positionné en upward-looking. L'ensemble des résultats et perspectives sont détaillés dans le rapport spécifique « **Rapport technique sur l'étude de faisabilité de l'utilisation du GPR (Ground Penetrating Radar) Dans le cadre du suivi des modifications de la structure verticale du manteau neigeux** ».

## A1.5 Evaluation du transport de la neige par le vent

*P.TE SEEHORE*

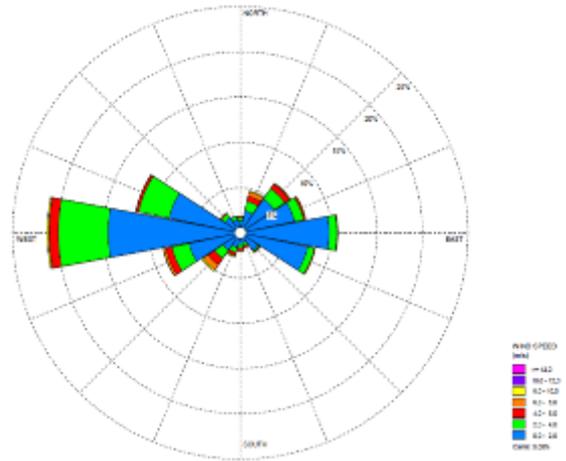
Les travaux pour l'installation d'un système de mesure du transport de la neige par le vent ont terminés fin novembre 2012. Cette installation a été réalisée sur la crête du site de la P.te Seehore, à environ 2570 m, à Gressoney La Trinité.



*Site de la P.te Seehore (2570 m)*

Suite à la collaboration avec IRSTEA (réunions et visite de terrain au Col du Lac Blanc), des capteurs similaires ont été installés sur le site du Col du Lac Blanc et à la P.te Seehore. Les capteurs choisis sont fabriqués par la société Wenglor et ils mesurent le nombre de particules qui traversent un rayon optique de surface donnée pendant un temps donné. Sur le mât de 6 m, 4 détecteurs wenglor, un nivomètre, un anémomètre et un anémoscope ont été installés.

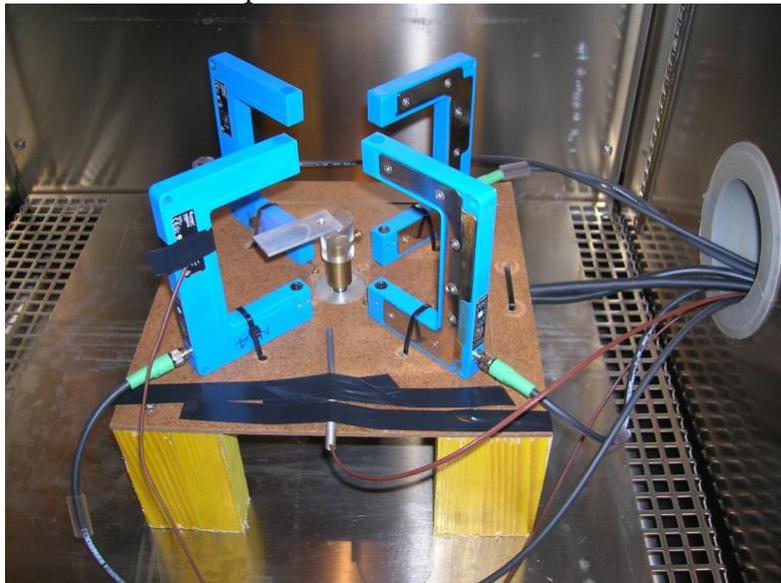
Le but de l'installation a été celui d'estimer la quantité de neige transportée par le vent à différentes hauteurs. La transmission des données est réalisée par un système wi-fi, qui envoie les données dans le refuge installé à côté de l'obstacle. De là, les données sont transmises à la station du Gabiet. Toutes les données sont enregistrées et transmises en temps réel.



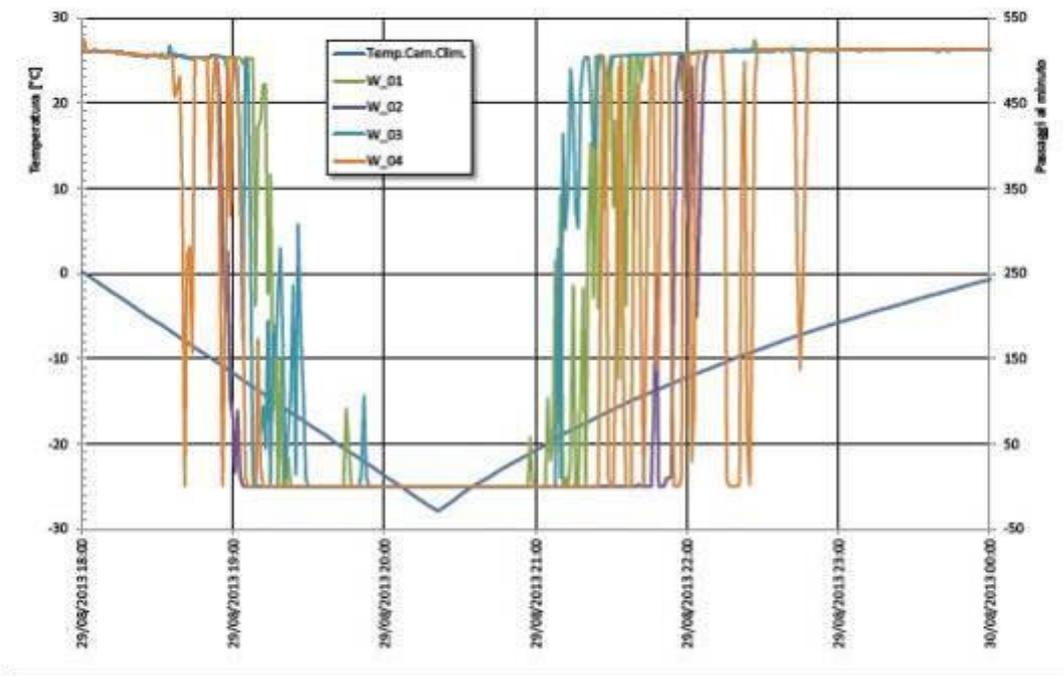
*Capteur wenglor installé et condition du vent au site de la P.te Seehore (15.02.2013-03.05.2013)*

Après les analyses des données de la saison hivernale 2012-2013, les résultats ont démontré un mauvais fonctionnement des wenglors surtout à basses températures. Pour chercher de résoudre les problèmes, plusieurs confrontations ont été réalisées avec le partenaire IRSTEA, qui, lui aussi, a eu les mêmes problèmes.

A' ce propos, pendant l'été 2013, les capteurs ont été testés en laboratoire au Politecnico de Turin, dans une chambre froide, afin de comprendre les causes du mauvais fonctionnement.



*Tests dans la chambre froide à Turin (29.08.2013)*



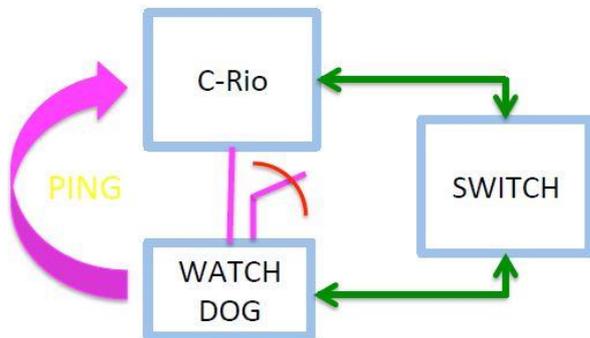
*Résultats des tests aux baisses températures*

Une fois résolus les problèmes liés aux capteurs, pendant l'automne, nous avons eu des problèmes sur les systèmes d'alimentation et de transmission des données. Plusieurs interventions ont été réalisées : 22.07, 21.08, 12.10, 30.10, 07.11, 13.11, 28.11, 05.12 et le 23.12. Après ces interventions nous avons résolu les problèmes liés à l'alimentation du système, mais des problèmes restent sur le système de transmission des données.



*Logement des systèmes d'acquisition et transmission des données*

Pendant l'été 2014, pour résoudre les problèmes d'alimentation et transmission des données, des intégrations au système ont été réalisées. En particulier, afin d'empêcher le manque des données, un système de redémarrage automatique des capteurs a été installé, avec un watch dog. En outre, pendant l'été, un nouveau capteur de direction du vent a été installé.



Le système de redémarrage installé (à gauche) et le nouveau capteur en rouge (à droite)

Les mesures réalisées au site ont permis de définir l'évolution des vents qui caractérisent le site de la P.te Seehore. A' ce propos, les analyses conduites ont été finalisées à comprendre les conditions les plus favorables pour avoir des accumulations de neige sur la pente qui puissent influencer les aires de déclenchement d'une avalanche.



Deux situations analysées à P. te Seehore: vent synoptique (flèche azur) de provenance de NO (à gauche) et de O (à droite) et vent local (flèche blanche).

Ces informations acquises pendant le projet ont permis de mieux comprendre les épaisseur des déclenchements des différentes avalanches qui se sont déclenchée dans le site.

#### COL DU LAC BLANC

(F. Naaim-Bouvet, H. Bellot, F. Fontaine, Y. Ito, Irstea)

Le site du Col du Lac Blanc est un des sites d'étude du projet MAP3 dédié à l'étude du transport de neige par le vent. Il est situé dans le massif des Grande Rousse à 2700 m d'altitude et se trouve à proximité du domaine skiable de l'Alpe d'Huez. Il est exploité depuis vingt ans pour l'étude du transport de neige par le vent conjointement par IRSTEA et Météo France. Une des caractéristiques principales et par la même un atout du col, est d'avoir des vents dominants orientés à plus de 80% sur un axe nord sud. En effet, sa situation géographique entre le Dôme des Petites Rousses et la chaîne principale des Grandes Rousses limite l'effet des vents entrants d'orientations différentes.

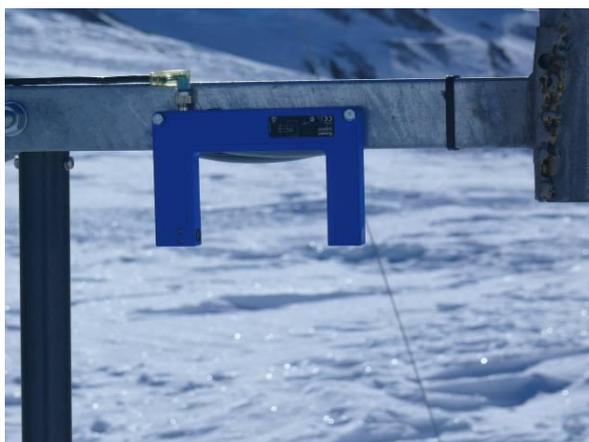
Ce site se comporte donc comme une soufflerie naturelle. Le site du Lac Blanc est équipé d'un ensemble de trois stations automatiques pérennes; deux sont situées de part et d'autre du Col du Lac Blanc (expositions Nord et Sud) tandis que la troisième est sur un point surplombant voisin (Dôme des Petites Rousses - 2800 m) afin d'obtenir une mesure plus indépendante des effets de couche limite. Les principaux paramètres, mesurés en continu au pas de temps de 15 minutes depuis environ 20 ans durant la saison hivernale sont : la hauteur de neige, la température de l'air, la vitesse et la direction du vent et l'équivalent en eau des précipitations à 10 m au dessus du sol nu. Dans le cadre du présent projet, l'instrumentation a été renforcée par la mise en place de différents capteurs optiques permettant d'estimer le flux de neige transporté (Snow Particle Counter, Wenglor, Automatic Blowing Snow station). Outre le projet MAP3, le site bénéficie de financements nationaux (INEV et CENACLAM) et d'une collaboration avec Météo France (Centre d'étude de la neige) qui co-gère le site, d'un financement bilatéral franco-autrichien (PCH AMADEUS) et d'un échange bilatéral France-Japon.



*Site expérimental du Col du Lac Blanc*



*Snow particle counter*



*Wenglor*



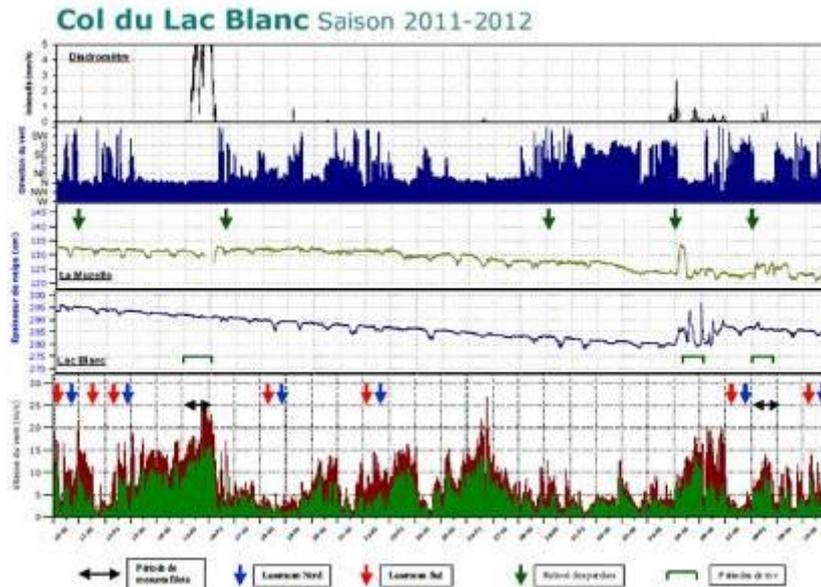
*Installation des Automatic Blowing Snow Station*



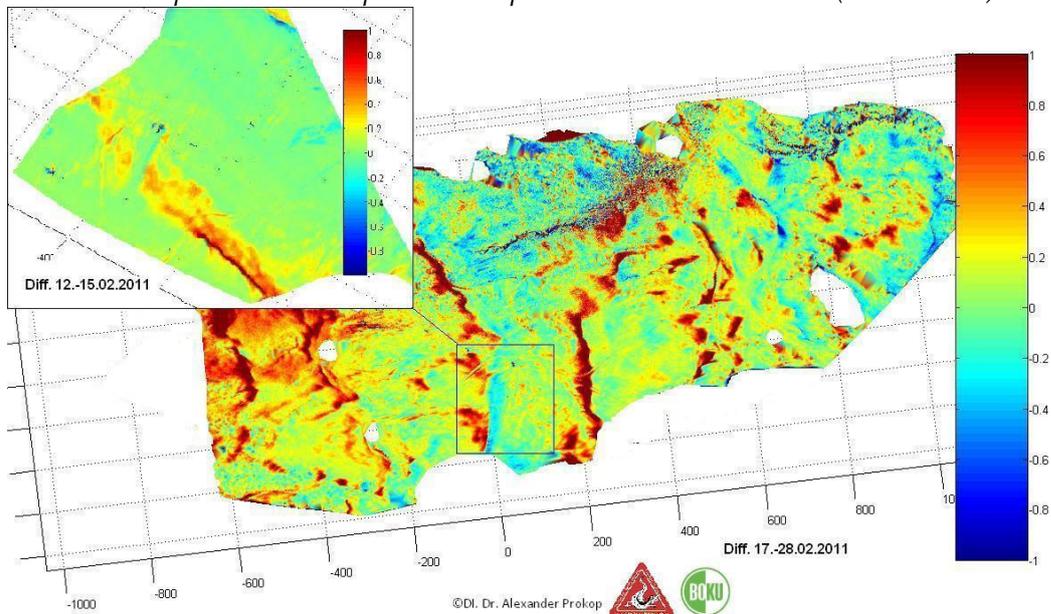
*Le Banc de transport : ABS, SPC et Wenglor*

Outre les enregistrements automatiques, le protocole de mesures de l'hiver est le suivant :

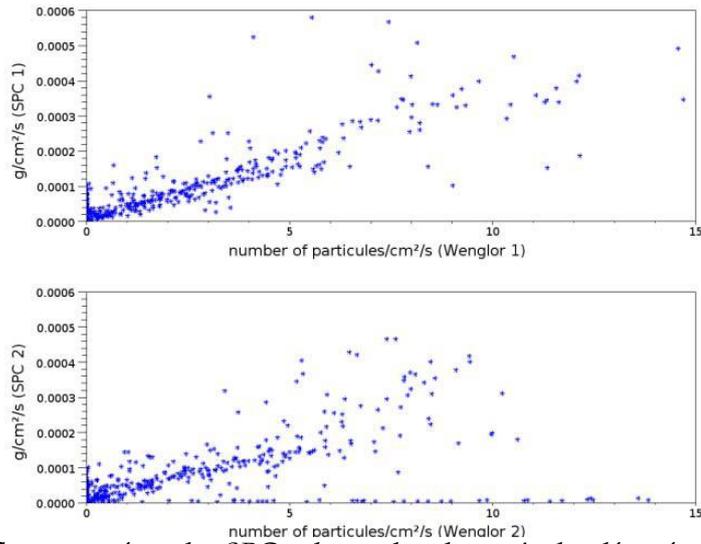
- Avant un épisode de transport de neige : détermination des hauteurs de neige grâce à un laser scan terrestre et caractérisation du manteau neigeux
- Pendant un épisode neigeux : mesures du profil de vitesse de vent par anémomètres, mesures manuelles de flux de neige grâce à des capteurs type filets à neige et mesures automatiques du flux de neige par SPC , ABS et Wenglor.
- Après l'épisode : détermination des hauteurs de neige grâce à un laser scan terrestre.



Episodes de transport étudiés pendant l'hiver 2011-2012 (CEN-INEV)



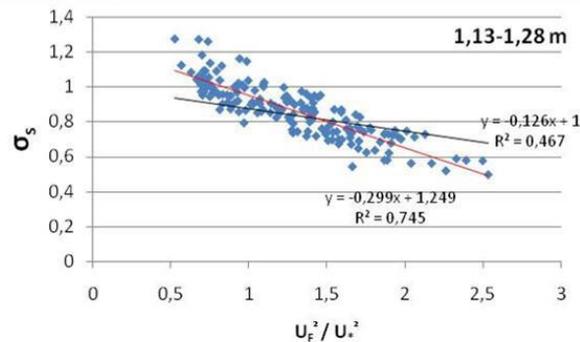
Mesures par Laser scan terrestre au col du Lac Blanc et carte des hauteurs de neige (BOKU-A.Prokop)



Relation entre le flux mesuré par les SPC et le nombre de particules détectées par le Wenglor pour une hauteur et un épisode de transport donné.

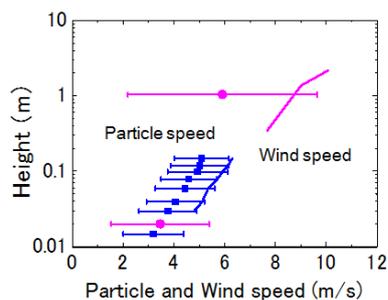
Les résultats obtenus concernent

- Les performances des capteurs de transport de neige par le vent (se reporter au rapport technique spécifique en annexe)
- Les comparaisons entre les mesures par laser-scan, le paramètre basé sur la topographie du terrain introduit par Winstral et al (2002) et permettant de décrire les effets du vent sur la distribution de la neige, les simulations de vent faites sous ARPS (Advanced Regional Prediction System) (Prokop et al., 2013b) – article soumis à CRST
- La caractérisation de la taille des particules, la vitesse de chute et le nombre de Schmidt lors d'un épisode de transport de neige (Naaim-Bouvet et al., 2013)



Variation du nombre de Schmidt en fonction du rapport (vitesse de chute/vitesse de frottement)<sup>2</sup>

- Les vitesses de particules de neige transportées par le vent en fonction de la hauteur et de la taille des particules et leur comparaison avec les modèles numériques (Nishimura et al., 2014).



Vitesse des particules et du vent (rose : col du lac blanc – bleu : soufflerie climatique)

Ces dernières expérimentations avaient été menées sur le site du Col du Lac Blanc et comparées avec des expérimentations réalisées précédemment dans une soufflerie climatique à Shinjo au Japon ([http://www.bosai.go.jp/seppyo/jikkentou/jikkentou\\_youran2011Ver3s.pdf](http://www.bosai.go.jp/seppyo/jikkentou/jikkentou_youran2011Ver3s.pdf)).

Dans le cadre du présent projet des expériences complémentaires ont été réalisées dans le même dispositif expérimental. Il s'agissait ici de créer une base de données permettant la comparaison des modèles numériques de transport de neige par le vent en conditions contrôlées (Naaim et al., 2013)



*Soufflerie climatique du Cryospheric Environment Simulator    Snow particle counter et anémomètre dans la soufflerie Simulator*

#### **A1.6 Mise à jour automatique du cadastre régional (AdHoc4MAP3)**

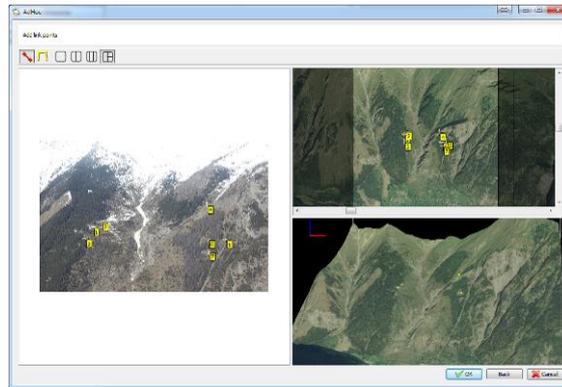
Une nouvelle méthodologie pour la délimitation rapide des avalanches a été développée par la Société AdHoc 3D Solutions de Gressan (AO).

La méthodologie associe les photographies réalisées par le Bureau Neige et Avalanches de la Région aux cartes thématiques et tridimensionnelles afin d'obtenir une limitation plus précises des phénomènes avalancheux et surtout des zones de dépôt.

Les images, réalisés par une caméra modifiée, sont géoréférencées suite à la définition d'au moins 3 points sur la carte et insérées dans le SIG, en format .shp.

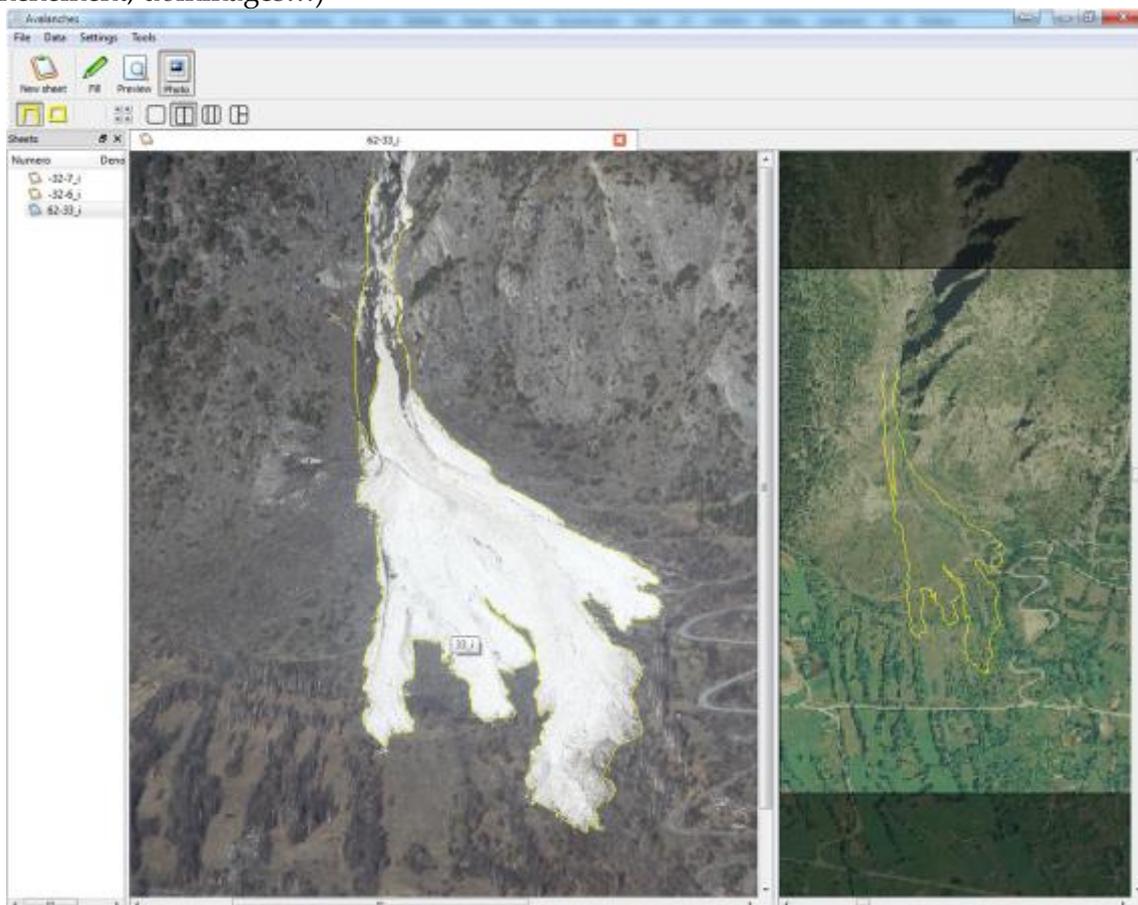
Cette procédure nous permet de transférer sur carte, avec une bonne précision, le contour d'une avalanche, mais aussi de réaliser des mesures pour caractériser le phénomène et il est possible rédiger un tableau avec toutes les données de l'avalanche, qui sera intégré dans Cadastre régional des avalanches afin d'obtenir une mise à jour rapide et facile à intégrer.

La méthodologie permet la gestion des images réalisées avec une caméra géoréférencée avec l'intégration du MNT (Modèle Numérique de Terrain) et les ortophotos de la Région. Suite à cette procédure, une image solide « 3D » est créée et insérée dans le SIG-3D.



*Points de localisation de l'évènement*

Le développement de la méthodologie permet, en temps rapide, d'insérer dans la cartographie régionale les limites des évènements, en considérant la morphologie réelle du canal avalancheux. Une fois obtenue l'image solide, les techniciens du Bureau neige et avalanche de la Région peuvent réaliser des mesures sur la cartographie (limites, zone de déclenchement, d'écoulement et de dépôt). En outre, on peut évaluer les distances de la zone de dépôt des avalanches des infrastructures humaines (routes, bâtiments, remontés mécaniques...). Le shape file de l'avalanche est intégré par un tableau avec différentes informations soit de default (commune où il s'est produit l'évènement, exposition, pente....) soit remportées par le technicien (date et horaire du déclenchement, dommages...)



*Reconstruction du contour d'une avalanche avec le logiciel AdHoc4MAP3*

Pour la calibration de cette méthodologie, trois sites en Vallée d'Aoste ont été choisis: P.te Seehore à Gressoney La Trinité, Menthieu à Valgrisenche et Crammont à Pré Saint Didier. Pour chaque site, plusieurs relevés ont été faits pendant l'hiver 2012-2013. Ils ont été complétés par du laser scanning et des relevés GPS.

Avec cette méthodologie le Bureau neige et avalanche de la Région dispose d'un outil pratique de recensement des événements avalanches, qui permet une mise à jour presque en temps réel du Cadastre régional des avalanches. Pour l'instant, cette procédure peut être utilisée seulement par les techniciens du Bureau neige et avalanche, mais, dans un futur, le but est de rendre la procédure encore plus simple pour être utilisée par plusieurs sujets et surtout pour être réalisée directement sur le terrain.

### A1.7 Détection automatique du déclenchement des avalanches (array infrasonique)

Deux systèmes d'array infrasoniques ont été installés par l'Université de Florence: un à Gressoney La Trinité, l'autre à Valtournenche.

stazione	Latitudine			Longitudine			Quota (m)
	gradi	primi	secondi	gradi	primi	secondi	
VLT1	45	52	47.36093	7	38	15.90468	1889
VLT2	45	52	51.22080	7	38	17.43708	1890
VLT3	45	52	50.36918	7	38	11.57093	1883
VLT4	45	52	49.58980	7	38	14.76468	1893
GRY1	45	51	19.65634	7	48	58.75382	1898
GRY2	45	51	17.24349	7	48	57.53318	1895
GRY3	45	51	19.43194	7	49	1.91923	1907
GRY4	45	51	21.95985	7	48	57.64855	1898

#### Array infrasonique GRY à Gressoney La Trinité

L'array GRY a été installé à Staffal, au Sud du village et des remontées mécaniques.



*Géométrie de l'array infrasonique*

Les phases d'installation du système infrasonique sont au nombre de trois :

- définition du site ;
- travaux infra structuraux ;
- installations des capteurs.

La première phase s'est déroulée durant le mois de juillet 2012. Plusieurs visites de terrain ont été réalisées à Gressoney pour choisir l'endroit le plus approprié pour l'installation des capteurs infrasoniques. Une fois l'endroit choisi, la Région s'est chargée d'obtenir les autorisations nécessaires à l'installation. Le système d'array infrasonique a été conçu avec une géométrie triangulaire pour avoir une bonne sensibilité de 1 à 10 Hz.

Le système est composé par 4 éléments, un central (GRY4) et les autres périphériques (GRY1, GRY2, GRY3), connectés par fibre optique. L'élément central est installé à proximité d'un arbre où les panneaux solaires sont ancrés. En bas, à côté de l'arbre, un petit refuge en bois a été réalisé où les systèmes d'alimentation et d'acquisition et transmission des données sont logés.

Les travaux d'infrastructure ont été réalisés en octobre 2012. Les capteurs ont été installés en novembre 2012.



*Différentes phases d'installation*

### Array infrasonique VLT à Valtournenche

L'array VLT a été installé à Champlève, à côté des pistes de ski de fond.



*Géométrie de l'array infrasonique*

Les phases d'installation du système infrasonique sont au nombre de trois :

- définition du site ;
- travaux infra structuraux ;
- installations des capteurs.

La première phase s'était déroulée courant 2011. Plusieurs visites de terrain ont été réalisées à Valtournenche pour choisir l'endroit le plus approprié pour l'installation des capteurs infrasoniques. Une fois l'endroit choisi, la Région s'est chargée d'obtenir les autorisations nécessaires à l'installation. Le système d'array infrasonique, comme celui de Gressoney, a été conçu avec une géométrie triangulaire pour avoir une bonne sensibilité de 1 à 10 Hz.

Le système est composé par 4 éléments, un central (VLT4) et les autres périphériques (VLT1, VLT2, VLT3), connectés par fibre optique. L'élément central est installé à proximité d'un arbre où les panneaux solaires sont ancrés. En bas, à côté de l'arbre, un petit refuge en bois a été réalisé où les systèmes d'alimentation et d'acquisition et transmission des données sont logés.



*Logement des systèmes d'acquisition et transmission des données*

Les travaux d'infrastructure ont été réalisés en juillet 2012. Les capteurs ont été installés en novembre 2012.

Les deux systèmes sont en fonction depuis 30.11.2012.

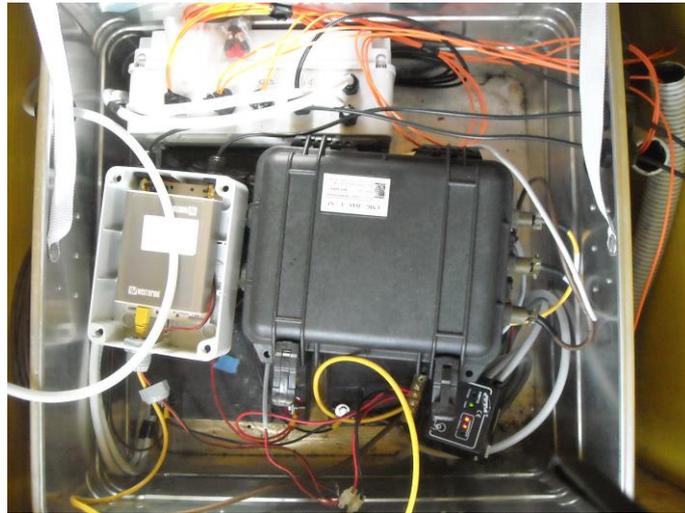
Le système d'enregistrement des données permet d'enregistrer soit l'amplitude soit la fréquence des signaux infrasoniques produits par une avalanche.

Le système d'acquisition permet d'enregistrer les signaux soit en local, soit pour être transférés via internet. Une pen drive (16Gb), installée dans le système, permet d'enregistrer, en local, toutes les données de la saison. Dans ce cas, si la transmission en temps réel ne fonctionne pas, aucune donnée n'est perdue.

Les systèmes infrasoniques disposent de microphones Optimic 2180, avec une sensibilité de 100 mV/Pa, dans un intervalle spectral de 20-20000 Hz. Les capteurs périphériques sont connectés au système d'acquisition via fibre optique.

La transmission en temps réel des données est réalisée par GSM/UMTS.

Le système d'alimentation des arrays infrasoniques est composé par des panneaux solaires (200W) et des batteries de secours (160 A).



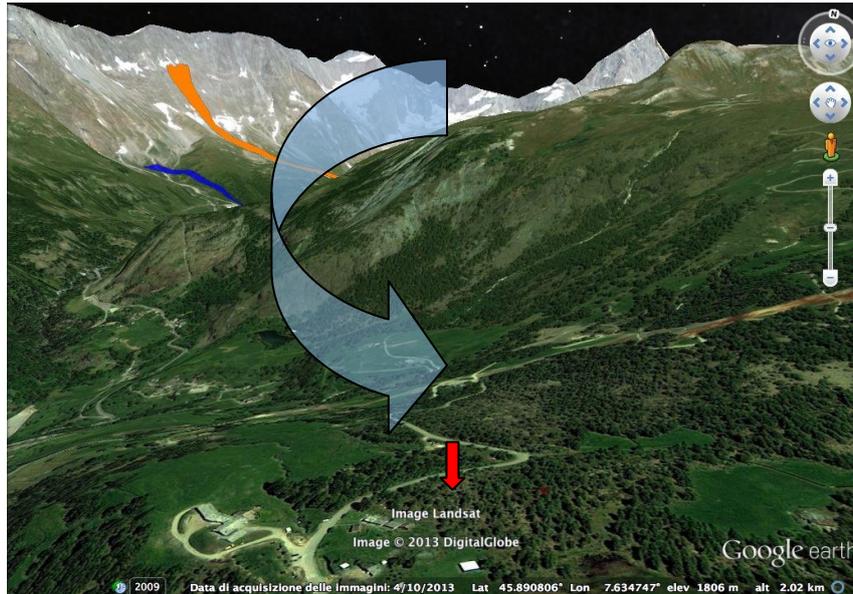
*Logement des systèmes d'acquisition et transmission des données*

Les problématiques ressorties pendant ces mois de surveillance de l'activité avalancheuse sont au nombre de deux: problèmes d'alimentation des capteurs, dus à l'endroit peu ensoleillé où les capteurs ont été installés, et problèmes de transmission des données, à Valtournenche, dus au faible signal GSM/UMTS présent.

Afin de résoudre ces problèmes, sur les deux sites, des batteries de secours ont été installées et un panneau solaire ajouté. A Valtournenche, des antennes ont été placées pour amplifier le signal de transmission de données.

Au cours du 2013 on a cherché toutes les informations de l'activité avalancheuse dans les secteurs couverts par les signaux des array infrasoniques. En particulier, les données concernent surtout les domaines skiables de Monterosa et Cervinia. En été-automne, des réunions ont été réalisées pour discuter sur les modalités d'échange des données entre les techniciens du bureau neige et avalanche de FMS et l'UNIFI. Dans les derniers mois du 2013, la page web où il est possible voir les données des array infrasoniques a été améliorée.

L'analyse des résultats a démontré que les systèmes installés peuvent enregistrer des événements avalancheux, petits et moyens, entre les 7 et les 40 km. Toutefois, on a vu que le vent fort et les barrières topographiques modifient la propagation de l'onde infrasonique sur les grandes distances (>5-6 km). En particulier, les deux conditions peuvent limiter l'amplitude et/ou modifier le front des ondes infrasoniques. La modification du front influence la direction de la source qui a produit l'onde et, par conséquent, il devient difficile définir la source sur la carte. Les résultats indiquent donc que les arrays peuvent définir la source des événements avalancheux, moyens et petits, à plusieurs kilomètres de distance à condition d'avoir des effets limités dus au vent et à la topographie.



*Parcours de l'onde infrasonique (en bleu) pour rejoindre le système infrasonique (en rouge) – Effets de la topographie*

D'autre part, l'analyse des données enregistrées par les arrays nous a démontré une bonne correspondance, spatio-temporelle, avec les périodes d'instabilité du manteau neigeux signalés par le Bureau Neige et Avalanche de la Région.

Enfin, le système array infrasonique définitif de suivi en temps réel, est composé par :

- 3 array (CHA, VLT et GRY) avec un système de transmission en temps réel ;
- un système d'acquisition et élaboration des données à Florence ;
- un server et une page web ([lgs.geo.unifi.it/map3](http://lgs.geo.unifi.it/map3)) pour la diffusion des informations.

Cette configuration permet de détecter une avalanche dans les 15 minutes de l'évènement, range de temps suffisant pour pouvoir utiliser le système dans la prévision du risque avalanche (24-72h, Chittrin et al., 1996).

La page web montre l'horaire d'enregistrement et la direction de provenance des signaux infrasoniques, compatibles avec les signaux générés par les avalanches naturelles. Le système représente un prototype de système de suivi, en temps presque réel, de l'activité avalancheuse naturelle, qui peut être utilisé par le Bureau neige et avalanche pour la prévision du risque avalancheux.

La page web présente deux modalités principales : **Real-Time** et **Archive/Period**.

Dans la section **Real-Time**, l'application web indique les back-azimuth et les horaires d'évènement enregistrés dans les dernières 48 h, selon deux menus :

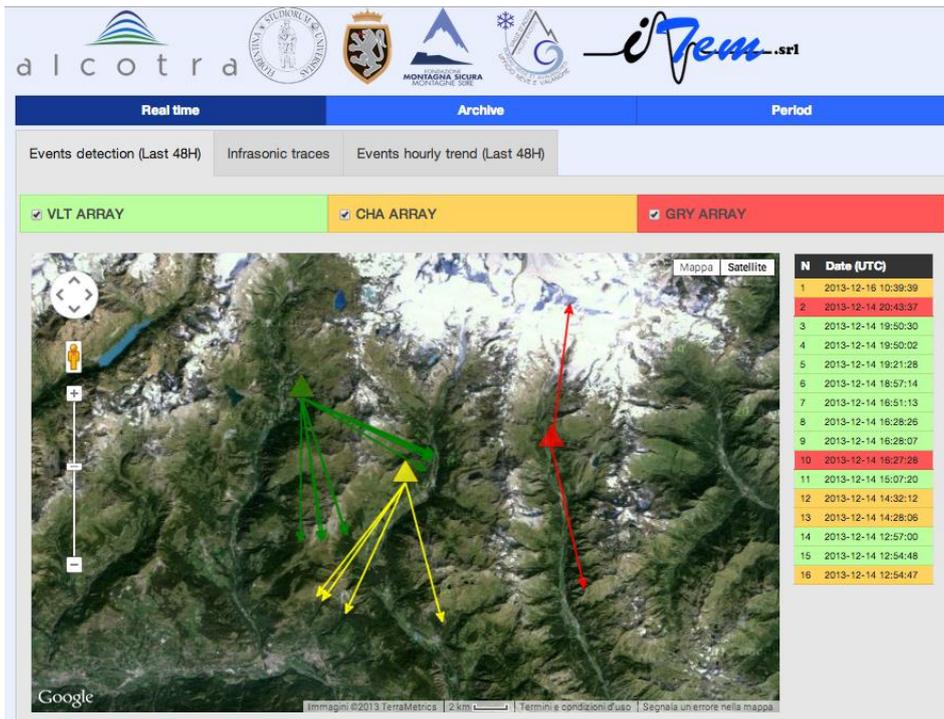
Events detections, last 48H. Le back-azimuth est indiqué sur le support cartographique Google Maps avec une flèche différente pour chacun système d'array installé (verte : VLT ; jaune : CHA ; rouge : GRY). Pour chaque évènement enregistré, il y a les indications suivantes :

- date : temps d'enregistrement (GMT) ;
- Azimuth : back-azimuth (°N) ;
- Vitesse : vitesse infrasonique (m/s) ;
- Pression : ampleur infrasonique (mPa).

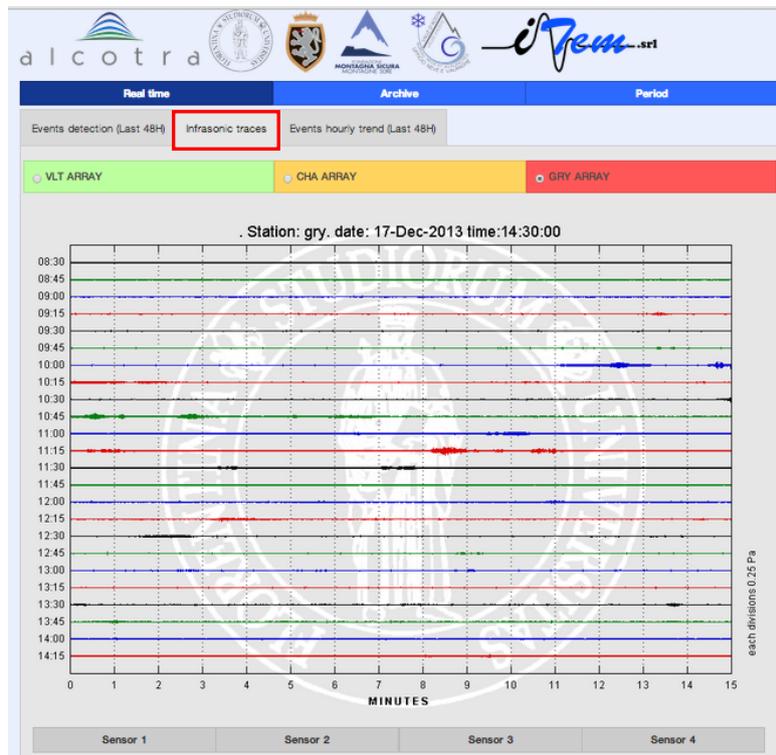
Ça, nous permet de définir, très simplement, l'horaire et le secteur géographique des signaux.

Events hourly trends, last 48H. Il y a le trend horaire du numéro des signaux représentés sur un graphique pour les différents systèmes (à différents couleurs).

Dans la page web il y a un tab menu **Infrasonic traces** où les enregistrements infrasoniques sont montrés sur image .png. Chaque image montre 6 heures de enregistrement.



Home page web dédiée à le partage des données en temps réel. ([lgs.geo.unifi.it/map3](http://lgs.geo.unifi.it/map3)).



Tab menu : infrasonic traces

Dans la section **Archive/Period**, l'application permet de voir les informations insérées dans le database. Deux archives sont présentes :

- **Archive** : il permet de voir (sur Google maps) les événements dans les 6 heures de temps ; dans cet écart de temps il est possible de voir l'horaire des événements naturels et le back-azimuth.
- **Period** : il permet de faire une recherche sur un écart de temps plus long, mais il ne permet pas de voir les traces infrasoniques.

Toutes les données enregistrées par les arrays infrasoniques ont été stockées dans un database MySQL, accessible par web et mis à jour tous les 15 minutes. Ces données peuvent être intégrées avec le database existant de la Région.

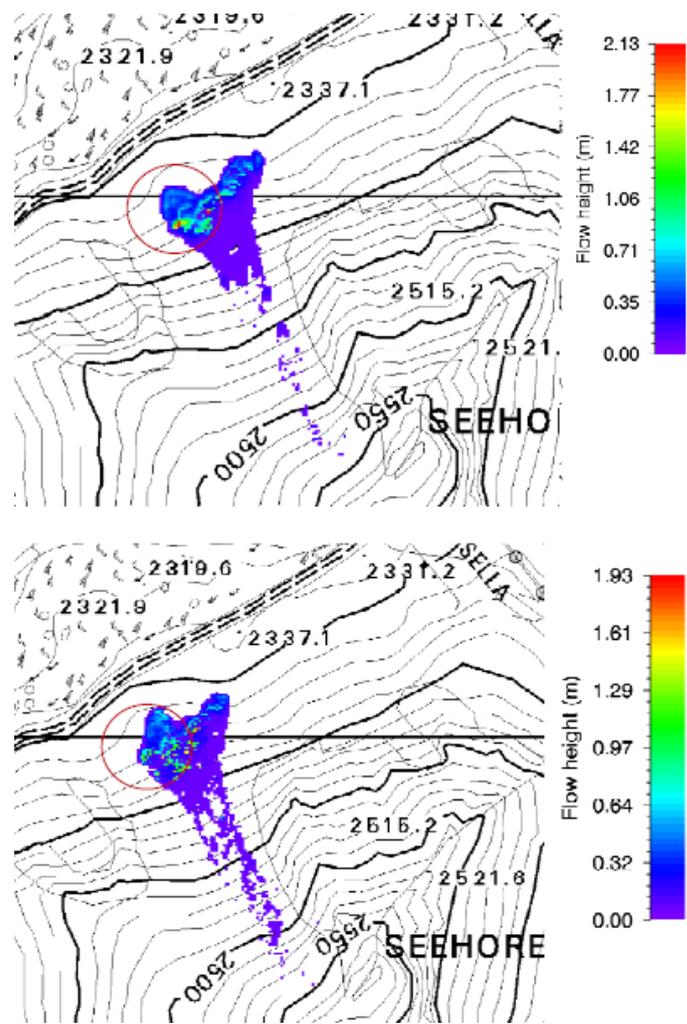
**ACTION 2** : **Validation et calibration spatio-temporelle des modèles de propagation du flux avalancheux.**

### **A2.1 Site de la P.te Seehore**

Des événements avalanches qui se sont produits au site de la P.te Seehore ont été reproduits avec le logiciel de l'SLF, RAMMS. Une collaboration a été établie entre le SLF et les centres de recherche italiens impliqués dans le projet. En ce moment, l'analyse des événements est faite avec une comparaison entre une cartographie DEM, qui représente la situation estivale, et une cartographie DSM, réalisée grâce aux relevés (laser scanner, photogrammétrie...) obtenus en hiver à l'occasion des déclenchements artificiels sur site.

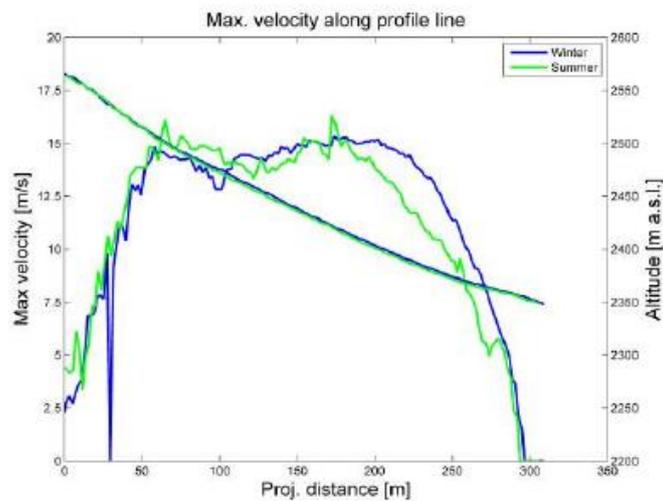
L'utilisation du modèle RAMMS démontre que le manteau neigeux et, surtout, le dépôt d'événements précédents influencent la dynamique d'une avalanche, que ce soit pour la trajectoire ou la vitesse.

En particulier, deux événements ont été analysés : l'événement du 27.03.2010 et l'événement du 26 février 2013. En ce qui concerne l'avalanche du 27.03.2010, les analyses ont montré une différence entre les parcours suivis dans la simulation avec le DEM estival et la simulation en utilisant le DSM hivernal. On a estimé que la cause de cette variation de parcours de l'avalanche est due à la présence du manteau neigeux et d'un dépôt préexistant.



Événement du 27.03.2010 – Différences entre parcours « estival » et « hivernal »

En ce qui concerne l'avalanche du 26.02.2013, les analyses ont aussi montré une différence entre les parcours suivis dans la simulation avec le DEM estival et la simulation en utilisant le DSM hivernal. En plus, dans ce cas, on a vu que les vitesses du flux avalanchueux changent selon la présence de la neige le long du chenal. Cette variation de vitesse est due à l'érosion de la neige lors de l'écoulement.

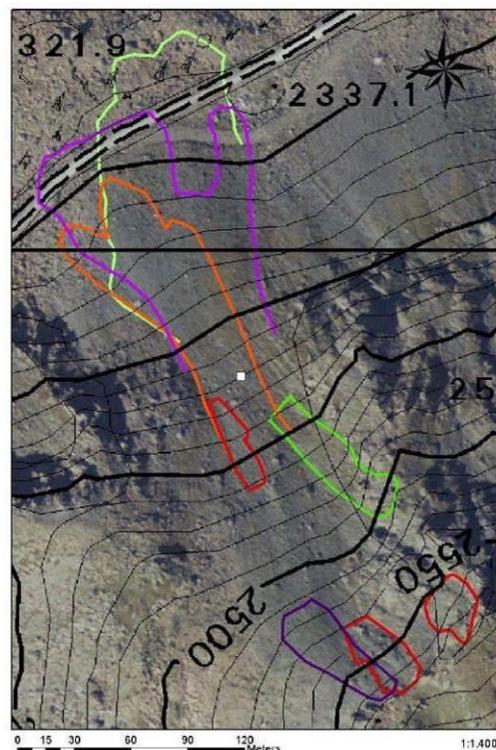


Événement du 26.02.2013 – Différences entre profil de vitesse « estivale » (vert) et « hivernale » (bleu)

Le site de la P.te Seehore, en particulier, a été utilisé pour l'analyse des simulations des avalanches de moyennes et petites dimensions, qui causent souvent des problèmes sur les routes et les remontées mécaniques. Ces avalanches sont difficiles à simuler avec les modèles classiques, qui ont été calibrés avec les paramètres des avalanches de grandes dimensions et ils ne tiennent pas compte de nombreux processus physiques importantes, y compris le glissement de la neige, la température de la neige, la granularité, le régime de transitions du flux et la densité variable du flux. Pendant le déroulement du projet, trois petites avalanches, déclenchées artificiellement sur le site de la P.te Seehore et bien documentés sur le terrain, ont été simulées avec le modèle de dynamique RAMMS. Ce modèle peut analyser l'érosion du flux avalancheux dans son parcours le long du canal et la variabilité de la friction dans l'interaction entre les grains.

En utilisant les données obtenues à partir des relèvements sur le terrain, les mesures laser scanner et l'analyse des vidéos, des paramètres du modèle qui reproduit les événements réels ont été trouvés.

Les analyses ont démontré que les modèles de dynamique des avalanches peuvent reproduire avalanches sur le terrain de petites dimensions avec une précision suffisante. Pour l'instant, le modèle ne peut pas encore être utilisé pour la mitigation du risque avalancheux des avalanches petites et moyennes, toutefois, il pourrait être déjà employé pour la définition du danger avalanche dans les stations de ski, où les incertitudes du modèle pourraient être surmontées en utilisant d'autres mesures de gestion du risque afin d'assurer la sécurité des pistes de ski. De nombreux processus clés impliqués dans l'écoulement avalanche peuvent maintenant être analysé avec les modèles (run-out, vitesse, pression d'impact), cependant, il est également clair que d'autres améliorations sont nécessaires (érosion et dépôt pendant l'écoulement, la contribution apportée par les déclenchements secondaires, l'influence de l'énergie du déclenchement artificiel sur la zone de départ, l'influence des modèles numériques de terrain, surtout hivernal, pour reproduire la réelle morphologie du terrain).



*Événements reproduits par RAMMS (07.12.2010, 05.03.2011 et 19.03.2011) sur le site de la P.te Seehore*

Un travail avec les résultats des simulations du projet a été soumis en 2014 pour la publication dans *Journal of Glaciology*.

Enfin, en février 2014, un échange technique entre partenaire italiens et français a été fait, à Grenoble, afin de pouvoir analyser ensemble les données d'un évènement produit au site de P.te Seehore. En particulier, les données de l'avalanche du 05.03.2011 ont été analysées pour chercher d'avoir une autre approche avec un autre modèle de simulation des avalanches : le modèle MN2D de l'IRSTEA de Grenoble.

Les activités menées dans le projet sont décrites dans le rapport technique spécifique en annexe.

## **A2.2 Site du Lautaret**

E. Thibert, G. Pulfer, M. Naaim (IRSTEA)

### **Contexte**

Les études et recherches sur la dynamique des avalanches restent fondamentalement liées à la connaissance encore très insatisfaisante que l'on a de la rhéologie de la neige en écoulement. Le formalisme de modélisation de Saint-Venant, cœur des modèles de propagation utilisés en expertise, permet de se passer de la connaissance précise de la loi rhéologique de comportement. L'effet de la rhéologie est alors intégré dans une loi de frottement entre le matériau en écoulement et le terrain. Toute la difficulté de la calibration des modèles d'écoulement repose donc dans la détermination de cette loi qui peut dépendre de la vitesse et de l'épaisseur de l'écoulement ainsi que des propriétés physiques de la neige.

### **Objectifs**

L'étude que nous avons engagée dans le cadre du projet MAP3 envisage de mettre au point une méthode de calibration pour extraire les paramètres de frottement pour des avalanches réelles décrites par un jeu de données assez complet (volume de départ, mesure locale de la hauteur et de la vitesse en fonction du temps, positions successives du front, géométrie du dépôt en zone d'arrêt) tel qu'on peut l'obtenir en déclenchement artificiel sur le site expérimental du Lautaret.

Il est envisagé dans un premier temps de mettre au point cette méthode de calibration sur un modèle physique à échelle réduite en utilisant des écoulements de matériaux granulaires de rhéologie connue. La rhéologie du matériau doit donc être initialement caractérisée par une méthode indépendante. Puis, on procède à l'observation en échelle réduite des écoulements de ce matériau à l'aide du même type de données disponibles en conditions réelles. Une méthode numérique d'optimisation doit être développée sur la base du modèle d'écoulement Saint-Venant pour extraire les paramètres de frottement qui reproduisent les écoulements observés. La méthode de calibration sera jugée satisfaisante si elle reproduit les paramètres rhéologiques du matériau connus par ailleurs. De plus, une estimation de l'erreur de la méthode pourra être faite sur la base de cette comparaison. Enfin cette méthode doit être appliquée sur des données issues du site expérimental du Lautaret pour extraire la loi de frottement d'avalanche de neige.

### **Méthode**

- *Le modèle physique* : Pour ceci, un modèle à échelle réduite (échelle type 1/250 à 1/500) du couloir n°2 du site du Lautaret a été construit (chenal et zone d'arrêt) sur la base d'une géométrie de type biplan. Il est alimenté par un écoulement granulaire.

- *La caractérisation rhéologique du matériau* : La caractérisation des propriétés rhéologiques par une méthode indépendante est utilisée pour disposer d'une connaissance a priori de la rhéologie du granulaire et effectuer une qualification de la méthode de calibration développée sur le biplan. On a utilisé le protocole proposé par Pouliquen (1999) qui consiste à étudier en canal dispositif la hauteur d'arrêt  $h_{stop}$  issue d'un écoulement en régime permanent du matériau sur une pente donnée. De la relation liant  $h_{stop}$  à la pente, il est alors possible de remonter à la loi de frottement (Jop et al., 2006 ; Pouliquen et al., 2006).

- *Application aux avalanches réelles :*

Nous avons utilisé naturellement le site d'étude expérimental du Lautaret et les données issues de déclenchements artificiels réalisés lors de l'hiver 2013. Actuellement on dispose sur un des couloirs d'avalanche des équipements permettant d'acquérir la mesure:

- D'un profil de vitesse et de pression sur la hauteur de l'écoulement obtenus à partir de signaux infrarouge et de capteurs à jauges de déformation,
- D'une séquence de positions successives du front de l'avalanche obtenue par un dispositif de photogrammétrie numérique.
- Le bilan de masse de l'avalanche à partir de levés laser-scan réalisés avant et après le déclenchement le jour du tir.

## Résultats

Ce travail mis en oeuvre dans le cadre de MAP3 est essentiellement porté par une thèse (G. Pulfer) et, à la date de rédaction du présent rapport, la troisième année de cette thèse est tout juste engagée (octobre 2014). Les résultats présentés par la suite ne sont donc que partiels et relatifs surtout aux développements instrumentaux et métrologiques.

### *Modèle physique sur biplan granulaire*

L'objectif de cette expérience de laboratoire est de produire des écoulements observables dans des conditions similaires à ce que nous mesurons sur le site du Lautaret en avalanche réelle. Pour cela des écoulements d'un matériau granulaire sont réalisés dans un chenal à 2 pentes (biplan) jouant le rôle de zone de départ-accélération et de zone d'arrêt des écoulements. Nous avons retenu comme matériau des billes de verre de 1.1 mm de diamètre. Le volume de bille est fixé ainsi que l'épaisseur initiale de l'écoulement généré ce qui conditionne donc la morphologie de départ des écoulements. Dans la partie supérieure la plus inclinée (30°) où l'écoulement est accéléré, l'écoulement est chenalisé (largeur 25 cm). Dans le biplan inférieur de pente plus modérée (25°) qui représente la zone d'arrêt, l'écoulement est à bord libre. Le fond des 2 plans du canal est recouvert de papier de verre pour imposer une rugosité et générer un cisaillement à la base de l'écoulement. Le même couple matériau granulaire/rugosité qui établit les conditions de cisaillement est utilisé pour la caractérisation rhéologique en canal inclinable.

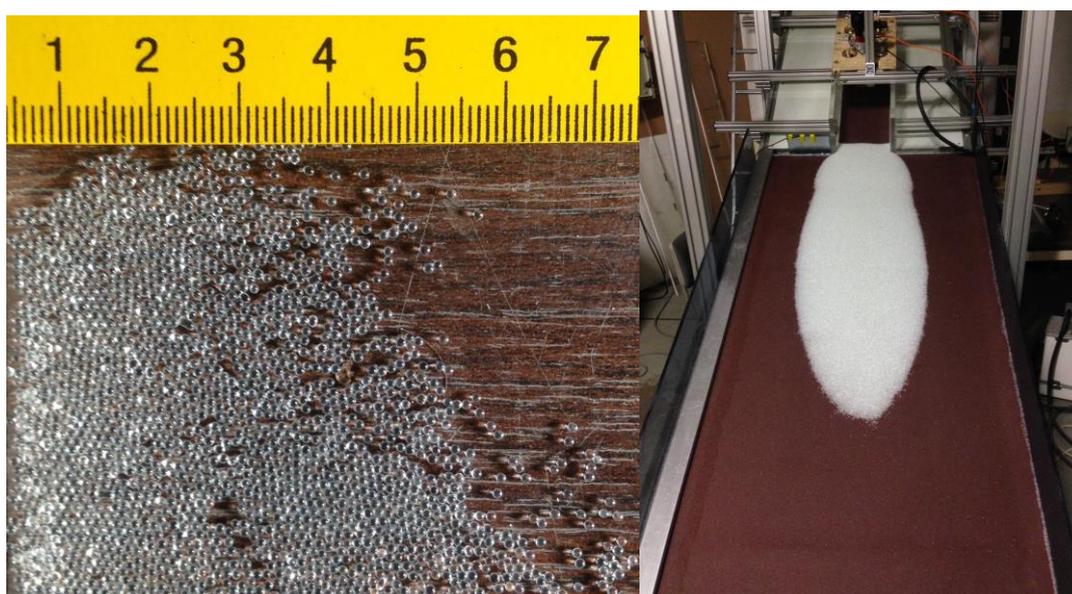


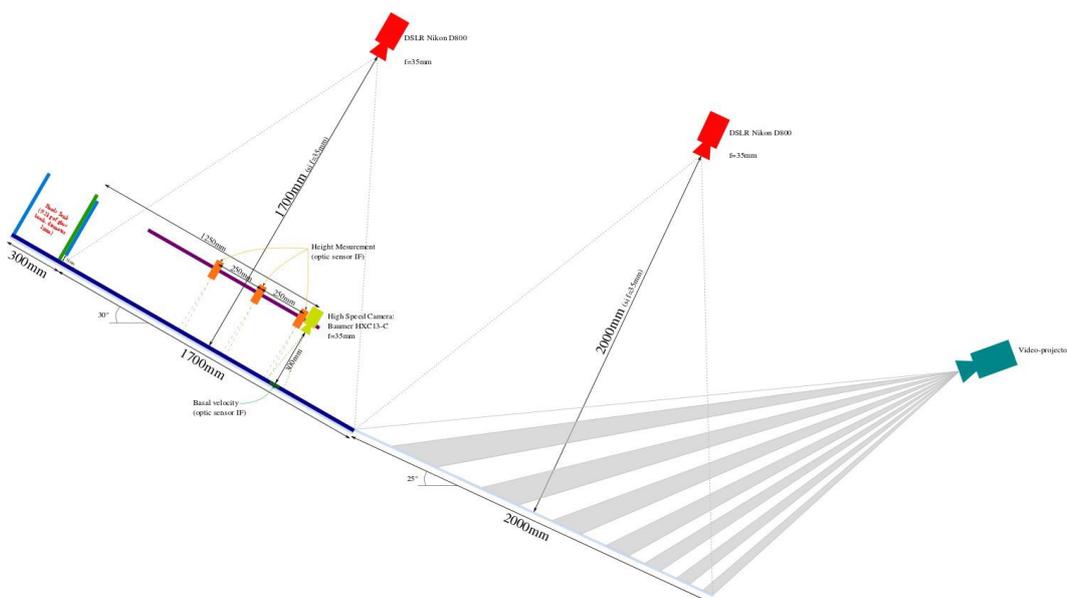
Figure de gauche : Billes de verre de 1.1 mm de diamètre utilisées pour les expériences en biplan.

Figure de droite : Biplan utilisé pour réaliser et observer les écoulements de bille de verre dans des conditions d'observation équivalentes à celles mises en oeuvre in situ au Lautaret

La conduite de campagne de mesures sur le modèle physique du biplan en utilisant une instrumentation similaire à celle utilisée sur le terrain au Lautaret exige de quantifier la vitesse et la hauteur de l'écoulement dans la zone accélérée (disponibles au tripode installé au Lautaret, un peu à l'amont de la transition entre zone accélérée et zone d'arrêt), la position du front de l'avalanche dans les 2 sections du biplan et la géométrie (épaisseur en tout point) du dépôt dans la zone d'arrêt.



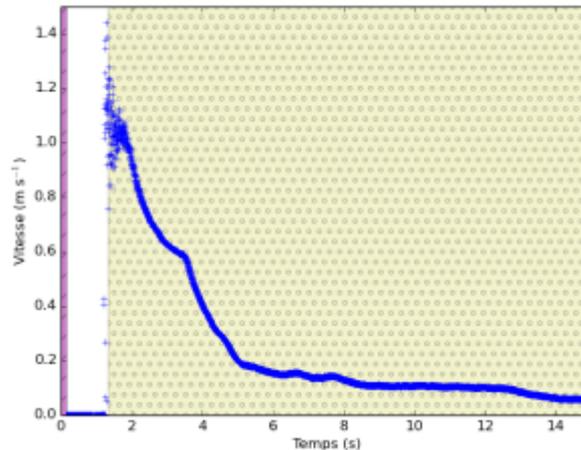
*Vue de l'implantation du tripode où sont réalisées les mesures de vitesse et d'épaisseur de l'écoulement dans le couloir n°2 du Lautaret, à l'amont de la rupture de pente entre le couloir et la pente ouverte de la zone d'arrêt. A droite, l'abri hébergeant les systèmes d'acquisition et l'informatique. A droite une image du biplan.*



*Le biplan et les dispositifs d'observation des écoulements mis en œuvre de manière analogue à ceux disponible in situ au Lautaret.*

### Vitesse de l'écoulement

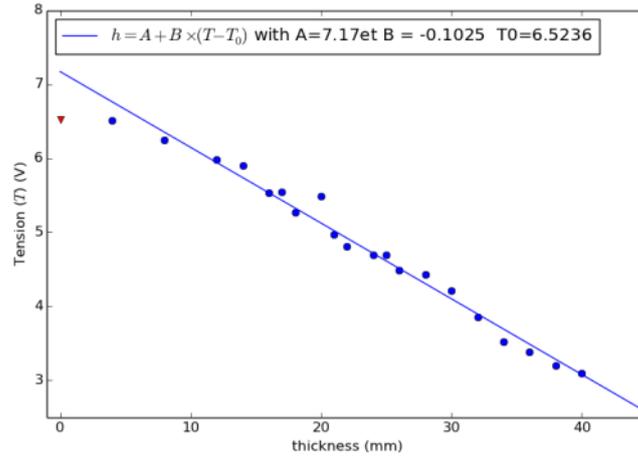
Pour reproduire les mesures de vitesse de l'écoulement réalisées au Lautaret à l'emplacement du tripode, nous utilisons une caméra rapide afin d'obtenir une mesure de la vitesse par PIV (Particle Image Velocimetry). A l'aide d'une prise d'images 1200×1080 pixels perpendiculaires au fond du canal menée à une fréquence d'acquisition de 300 images/s, nous avons effectué une corrélation d'images et obtenu les déplacements en coordonnées pixels puis métriques (par mise à l'échelle des clichés) des billes de verre situées à la surface libre de l'écoulement. Les résultats de cette mesure de vitesse de surface sont tracés sur la figure suivante pour un écoulement d'une dizaine de seconde d'un volume de 1000 billes.



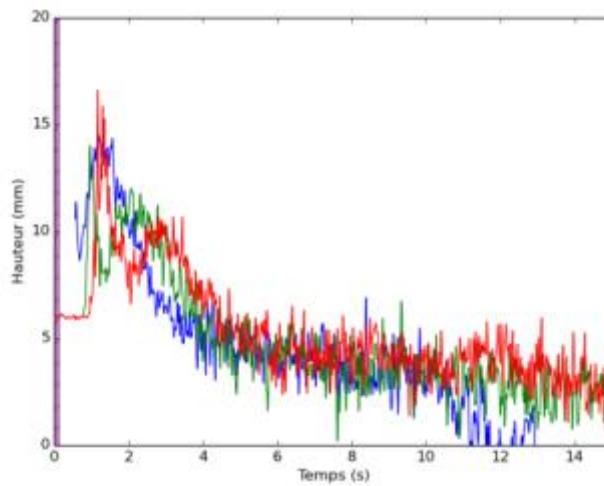
*Evolution de la vitesse mesurée par PIV (Particle Image Velocimetry) granulaire à la surface d'un écoulement de 10000 billes.*

### Hauteur de l'écoulement

La deuxième mesure disponible au tripode et que nous souhaitons effectuer sur le biplan est la mesure de hauteur de l'écoulement. Pour cela trois capteurs de hauteur de type industriel ont été utilisés (Leuze Electronique IR-M12). Ils émettent un signal infrarouge qui est réfléchi/rétrodiffusé sur les surfaces rencontrées. La mesure qui s'effectue à la fréquence de 100 Hz est de type IMEL Infrarouge (mesure de déphasage entre émission /retour d'une onde IR modulée en amplitude). Les billes de verre étant un matériau très particulier (dispersé, transparent, etc...) faire une mesure sur ce matériau s'avère par conséquent assez délicat. Un étalonnage précis sur des épaisseurs de billes connues (en statique) a été réalisé à partir de la mesure brute de tension des capteurs sur les billes utilisées pour les écoulements. Un profil temporel d'évolution des hauteurs mesurées par les 3 capteurs sur un écoulement sont indiqués ci-après.



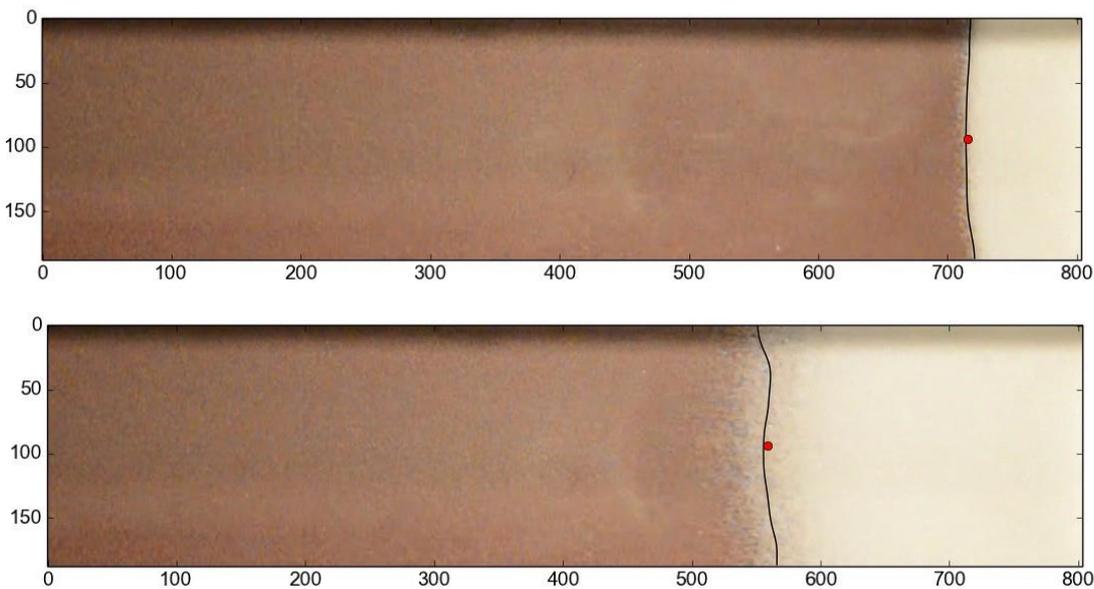
Résultats d'étalonnage d'un des trois capteurs de hauteur utilisés pour mesurer la hauteur de l'écoulement.



Evolution de la hauteur d'écoulement en 3 points de la partie supérieure du biplan (en bleu, rouge et vert, respectivement de l'amont à l'aval)

### Position du front de l'écoulement

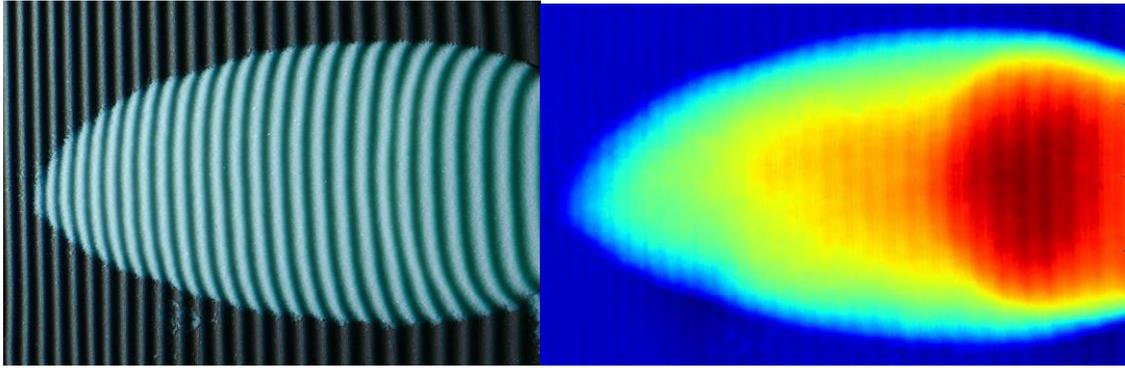
Est également reproduite une mesure équivalente à la mesure photogrammétrique développée au Lautaret pour positionner le front de l'avalanche tout au long de l'écoulement, c'est-à-dire de la zone de départ à la zone d'arrêt. Sur le biplan, une mesure photogrammétrique n'est pas nécessaire car le front des écoulements est une courbe plane (intersection de la surface gauche de l'écoulement avec le plan du fond du canal). Par conséquent, dans chaque section plane du biplan, une seule caméra est suffisante pour positionner le front. Nous réalisons à cet effet des films en vue de dessus (perpendiculairement au fond du canal) en full-HD à une résolution temporelle de 30 image/s et en format 1920×1080 pixels. Ces films sont réalisés à partir de 2 reflex Nikon D800 acquis spécifiquement et équipés d'un objectif 35 mm. Puis par un traitement d'image utilisant une méthode de seuillage (identification du front plus ou moins dilué avec le fond du canal), nous mesurons la position du front de l'avalanche au cours du temps.



*Positionnement du front des écoulements par vue monoscopique et traitement d'image (de type seuillage) pour discriminer les billes en écoulement du fond du canal. L'échelle indique la longueur (mm) le long de l'axe du biplan (section amont). La durée séparant les 2 images est de 0.16s.*

### Géométrie du dépôt

Enfin, la mesure de la forme et de l'épaisseur des dépôts est réalisée à l'aide de la méthode de projections de frange. Des tests satisfaisants ont été réalisés suite à l'équipement en nouveau matériel de vidéo-projection s'adaptant à la grande surface du biplan aval et permettant d'augmenter la résolution et la précision des mesures. L'image des franges est capturée par le même boîtier reflex D800 utilisé pour positionner en dynamique le front de l'écoulement dans le biplan inférieur, mais cette fois-ci en format image (et non vidéo) 24x36 mm (FX) soit 7360x4912 pixels. Une mise à l'échelle doit encore être réalisée pour disposer de la mesure de hauteur à partir de la déviation des franges.



Exemple de projection de frange sur un dépôt d'écoulement et des épaisseurs déduites de la déviation des franges (sans mise à l'échelle).

#### Caractérisation rhéologique du couple matériau/fond rugueux

Une caractérisation des propriétés rhéologiques par une méthode indépendante est utilisée pour disposer d'une connaissance a priori de la rhéologie du granulaire et effectuer une qualification de la méthode de calibration développée sur le biplan. On a utilisé le protocole proposé par Pouliquen (1999) qui consiste à étudier en canal la hauteur d'arrêt  $h_{stop}$  issue d'un écoulement en régime permanent du matériau sur une pente donnée. De la relation liant  $h_{stop}$  à la pente, il est alors possible de remonter à la loi de frottement (Jop et al., 2006 ; Pouliquen et al., 2006).

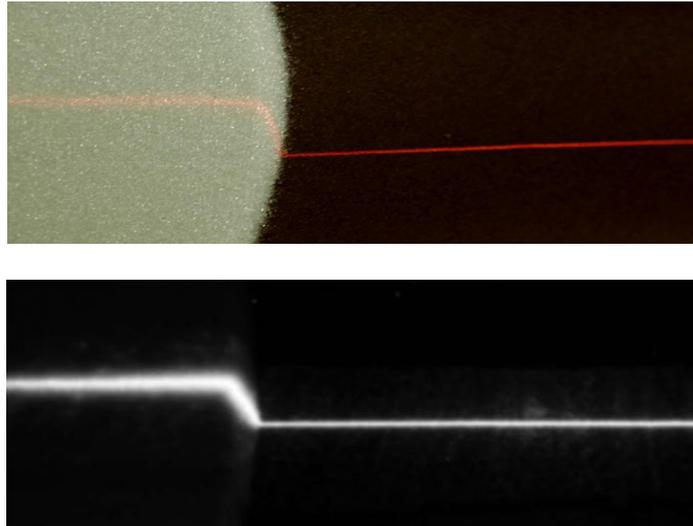
Il faut donc déterminer :

- la courbe  $h_{start}(\theta)$ , hauteur de mise en mouvement d'une épaisseur  $h$  de bille sur le plan rugueux incliné de l'angle  $\theta$ ,
- la courbe  $h_{stop}(\theta)$  hauteur d'arrêt d'une épaisseur  $h$  de bille sur le plan rugueux incliné de l'angle  $\theta$  (obtenue avec 2 méthodes dite 1 & 2)

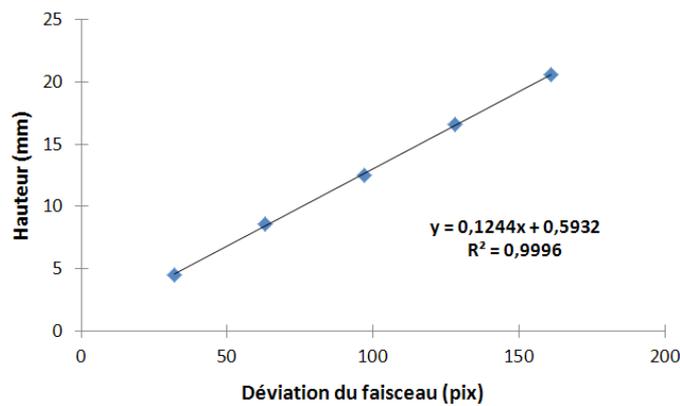
Le dispositif de mesure se compose d'un canal inclinable à l'aide d'un vérin commandé par un moteur pas à pas. La mesure de l'angle d'inclinaison se fait à l'aide d'un inclinomètre. La mesure de hauteur des billes s'effectue par déviation d'une ligne laser longitudinale. La déviation est captée sur une image horizontale au fond du canal et mise à l'échelle à l'aide d'un étalonnage.



Canal inclinable utilisé pour les mesures des courbes  $h_{start}(\theta)$  et  $h_{stop}(\theta)$ . Le haut de la structure supporte l'appareil photographique utilisé pour imager la déviation de la ligne laser.



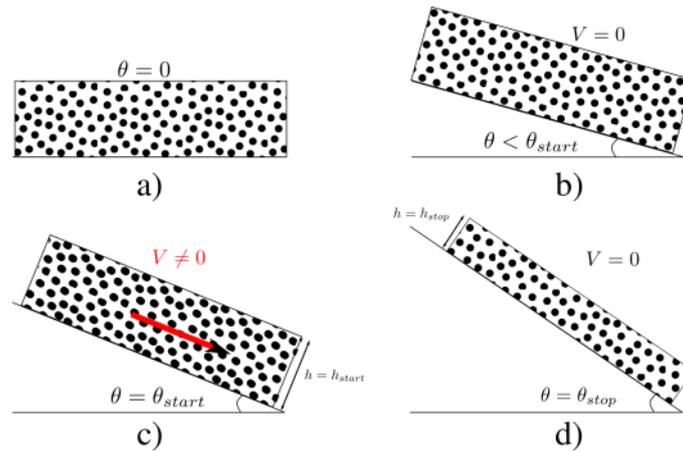
Déviaton de la ligne laser : vue oblique (en haut) et image horizontale (en bas) utilisée pour la mesure.



Déviaton de la ligne laser : vue oblique (en haut) et image horizontale (en bas) utilisée pour la mesure.

### Mesure de la courbe $h_{start}(\theta)$

Pour obtenir la courbe  $h_{start}(\theta)$ , nous avons procédé de la manière suivante : On étale une couche de grains d'épaisseurs constante sur toute la largeur du plan et sur une longueur d'environ 50 cm (Figure A2.13a). Ensuite, on augmente l'angle d'inclinaison jusqu'à une valeur de  $\theta$  donnée pour laquelle un écoulement vient se produire naturellement. On obtient un couple  $[h_{start}, \theta_i]$  qui nous donne un point de la courbe  $h_{start}(\theta)$ . L'opération a été répétée 87 fois afin de balayer tout le spectre de hauteur pouvant générer des écoulements mais également pour avoir la meilleur description du phénomène. Le déclenchement de l'écoulement présente un caractère instable. Ce spectre est compris entre  $h/d \approx [0,20]$ .



Description schématique du dispositif expérimental dans la configuration méthode 1. a) Etat initial. b) Augmentation de l'angle du plan (la couche de grain est stable). c) Déstabilisation de la couche de grain à un angle  $\theta_{start}$  permettant d'obtenir un couple  $[h_{start}, \theta]$ . d) Après l'écoulement une couche d'épaisseur homogène vient se former, elle définit un couple  $[h_{stop}, \theta]$  obtenu avec la méthode 1.

### Mesure de la courbe $[h_{stop}, \theta]$ méthode 1

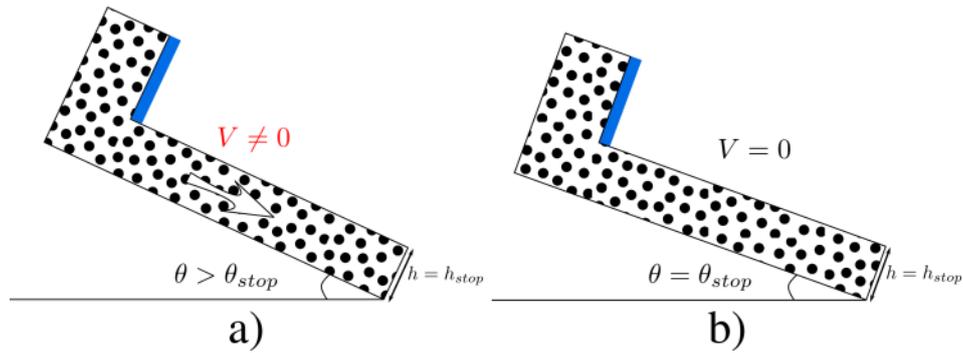
Après avoir généré un écoulement à partir d'une couche de grains d'épaisseur homogène, l'écoulement finit par s'affiner puis par s'arrêter. L'épaisseur ainsi obtenue lors de cet arrêt est homogène sur toute la surface du plan et donne un couple de valeur  $[h_{stop}, \theta]$ . Ceci caractérise le phénomène d'arrêt. Cependant, il a été constaté que tout le spectre de hauteur attendue n'est pas accessible par cette méthode. Les épaisseurs d'arrêts générées par cette méthode sont en effet au maximum que de l'ordre de  $h/d \approx 3$ . Or, on s'attend d'après la bibliographie à obtenir des épaisseurs d'arrêts maximales de quasiment un ordre de grandeur supérieur, soit de l'ordre de  $h/d \approx 20$  car ce sont ces types de valeurs maximales que l'on obtient pour la courbe  $h_{start}(\theta)$ . On attend ce type de résultats car on retrouve pour toutes les courbes présentées dans l'étude du GDR Midi (2004) la même amplitude du rapport maximal  $h/d$  indifféremment pour les courbes  $h(\theta)$  en start ou stop.

Toujours d'après cette étude, on s'attend à ce que la forme fonctionnelle de la relation liant  $h$  à  $\theta$  soit :

$$\frac{h}{d} = B \frac{\tan(\theta_{max}) - \tan(\theta)}{\tan(\theta) - \tan(\theta_{min})}$$

### Mesure de la courbe $[h_{stop}, \theta]$ méthode 2

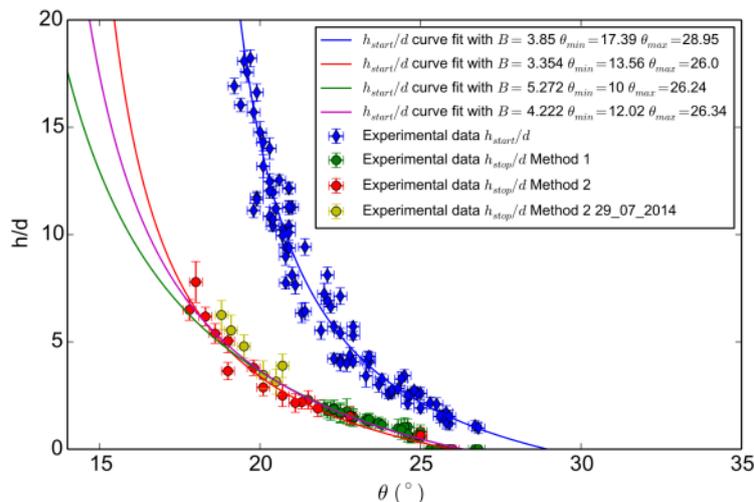
La méthode 1, utilisant la configuration permettant de caractériser les hauteurs de départs  $h_{start}(\theta)$  ne donnant pas satisfaction pour caractériser pleinement toute la plage de hauteur des phénomènes d'arrêts, nous avons modifié le dispositif expérimental relatif aux conditions initiales de l'écoulement. Ainsi nous appelons la seconde configuration méthode 2 qui, à la différence de la première méthode, impose un écoulement continu d'épaisseur constante. Pour cela on contraint l'épaisseur de l'écoulement à l'aide d'un système de trappe, derrière lequel se situe un réservoir de bille. On impose une pente suffisamment forte afin d'obtenir un écoulement permanent, puis on diminue l'inclinaison du canal jusqu'à obtenir l'arrêt de l'écoulement. On obtient ainsi un angle d'arrêt  $\theta_{stop}$  associé à l'épaisseur  $h_{stop}$  que nous avons imposée.



Description schématique du dispositif expérimental dans la configuration méthode 2. a) Écoulement permanent obtenue pour une épaisseur de grain imposée. b) Diminution de l'inclinaison jusqu'à obtenir l'arrêt de l'écoulement. Ceci renseigne un couple  $[h_{stop}, \theta]$  obtenu avec la méthode 2.

## Résultats

Les résultats sont distingués en trois séries de données. Une série décrivant apparemment très bien les phénomènes de départ constituée de 87 points de mesures différents. Ces données sont représentées par des losanges bleus sur la figure suivante. Les données sont tout de même relativement dispersées dans une étendue supérieure à l'incertitude de mesure estimée. Cette dispersion provient certainement du caractère particulièrement instable des départs d'écoulements granulaires qui sont très sensibles à la configuration initiale dans laquelle se trouve l'empilement (typiquement la présence ou non de faiblesse dans l'empilement (Pouliquen and Renaut, 1996)).



Courbes  $h_{start}$  et  $h_{stop}$  mesurées pour le système bille de verre (diamètre 1.1 mm) et le papier de verre P60. Les losanges bleus représentent la courbe  $h_{start}(\theta)$ . Les ronds représentent la courbe  $h_{stop}(\theta)$ . Les ronds verts ont été obtenus à l'aide de la Méthode 1. Les ronds rouges et jaunes avec la Méthode 2 (la différence de couleurs correspond à des points obtenus à deux dates différentes). Les couleurs font référence aux séries de données correspondantes, la courbe violette correspond à la réunion des séries de points verts, rouges et jaunes.

Nous avons aussi mesuré deux séries décrivant les phénomènes d'arrêts, c'est à dire la courbe  $h_{stop}(\theta)$ . La première obtenue avec la méthode 1 ne nous semblait pas satisfaisante car elle décrit un faible spectre de valeur  $h/d$ . Les valeurs maximales obtenues sont comprises grossièrement entre dans l'intervalle  $[0; 3]$ . Ceci s'apparente bien au type de courbes dite  $h_{stop}(\theta)$  obtenues par Pouliquen (1999). Ces données, consistant en une série de 39 points, ont été représentées par des ronds verts. Elles sont assez regroupées et présentent une variation de l'ordre de grandeur de

l'écart type de la mesure, exception faite pour la valeur de l'angle  $\theta_{max}$  mesurée qui accuse une assez forte variabilité.

Afin de compléter cette série de mesures considérée comme incomplète, nous avons appliqué la méthode 2. Ceci nous a permis d'obtenir une série de données présentant un spectre de  $h/d$  allant jusqu'à environ dix fois la taille de grain. Cette méthode est comparable à la méthode appelée  $\theta_{stop}(h)$  par Pouliquen (1999). Les points de cette série de mesure sont représentés par des ronds rouges et jaunes sur la figure précédente qui compte respectivement 16 et 6 points. Nous avons appliqué la même méthode pour obtenir ces deux séries, cependant elles ont été mesurées à deux périodes assez éloignées dans le temps ce qui peut être à l'origine d'une certaine variabilité dans les résultats.

Les mesures de la courbe  $h_{stop}$  sont similaires et se complètent du fait des deux méthodes employées, elles semblent donc bien décrire le couple matériau/grain dans la phase d'arrêt.

On remarque sur les séries de données obtenues que les spectres de valeurs  $h/d$  ne sont pas les mêmes pour la courbe  $h_{start}$  que pour  $h_{stop}$ . Nous ne sommes pas parvenus à mesurer des hauteurs d'arrêts aussi importantes que les hauteurs de départs. Ceci pose tout de même un problème, car la courbe  $h_{stop}$  doit théoriquement diverger vers l'infini lorsqu'elle atteint la valeur  $\theta_{min}$ . Or, on ne capte pas vraiment cette divergence avec les séries de points obtenus. Il est en effet difficile de générer des points dans cette zone, car lorsque l'on impose un écoulement de bille pour des épaisseurs élevées, le flux est très important. Ainsi nous ne sommes pas parvenu à balayer la zone des forts  $h/d$  car diminuer la pente lentement conduit à la vidange complète du réservoir.

D'un point de vue fonctionnel, les courbes de la figure précédente semble assez différentes, la courbe  $h_{start}$  ayant une pente relativement forte alors que la courbe  $h_{stop}$  est à pente plus modérée. Cette tendance est peut être renforcée par l'absence de données recueillies pour les fortes valeurs de  $h/d$  de la courbe d'arrêt. D'un point de vue fonctionnel, ces courbes expérimentales sont assez différentes et il ne semble pas, suite à ces résultats, que les courbes  $h_{start}$  et  $h_{stop}$  soient simplement translatées d'un certain angle l'une par rapport à l'autre.

### Interpolations des données

Afin d'extraire les angles  $\theta_{min}$ ,  $\theta_{max}$  et le facteur de forme  $B$  caractéristiques de la rhéologie du couple grain/rugosité du canal et expliquant la dépendance  $h(\theta)$ , il convient d'interpoler les séries de données.

Ces interpolations ont été réalisées sur les séries de données à l'aide de logiciels différents: la *CurveFittingtoolbox* de Matlab et la fonction *curve\_fit* de Python. Ce sont les données obtenues avec Matlab qui sont représenté sur la figure. La courbe bleue correspond à l'interpolation des données expérimentales de  $h_{start}$ , la courbe verte correspond au modèle obtenu avec les points expérimentaux de la méthode 1, la rouge celle obtenue avec la méthode 2 (uniquement les points rouges) tandis que la violette correspond à l'interpolation de tous les points mesurés pour  $h_{stop}$ .

Pour les résultats obtenus à l'aide de *curve\_fit* de python, c'est l'algorithme de Levenberg-Marquardt qui est utilisé. On obtient en sortie les valeurs des paramètres ainsi que la matrice de covariance associée à l'interpolation des points. On peut ensuite calculer l'écart type  $\sigma$  pour chacun des paramètres. Un des avantages de Python est de permettre d'intégrer l'incertitude sur les données dans le calcul de l'écart type  $\sigma$ . Pour les deux méthodes employées, on estime  $R^2$  permettant de juger de la qualité de l'interpolation. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant dans lequel sont précisées les valeurs des paramètres et l'écart type.

Type de courbe	Série de donnée	$B (\pm\sigma)$	$\theta_{\min} \pm \sigma()$	$\theta_{\max} \pm \sigma()$	$R^2$
$h_{start}$ (M)	Bleu	3.85( $\pm 0.67$ )	17.39( $\pm 0.2$ )	28.95( $\pm 0.88$ )	0.984
$h_{start}$ (P1)	Bleu	6.88( $\pm 0.34$ )	15.75( $\pm 0.15$ )	27.63( $\pm 0.13$ )	0.935
$h_{start}$ (P2)	Bleu	6.22( $\pm 0.20$ )	16.13( $\pm 0.08$ )	27.76( $\pm 0.11$ )	0.935
$h_{stop}$ (M)	Vert	5.272( $\pm 0.284$ )	10	26.24( $\pm 0.15$ )	0.931
$h_{stop}$ (M)	Rouge	3.354( $\pm 0.630$ )	13.56( $\pm 0.96$ )	26	0.957
$h_{stop}$ (M)	Violet	4.222( $\pm 0.530$ )	12.02( $\pm 0.723$ )	26.34( $\pm 0.218$ )	0.979
$h_{stop}$ (P)	Violet	4.501( $\pm 0.68$ )	11.72( $\pm 1.06$ )	26.13( $\pm 0.16$ )	0.955

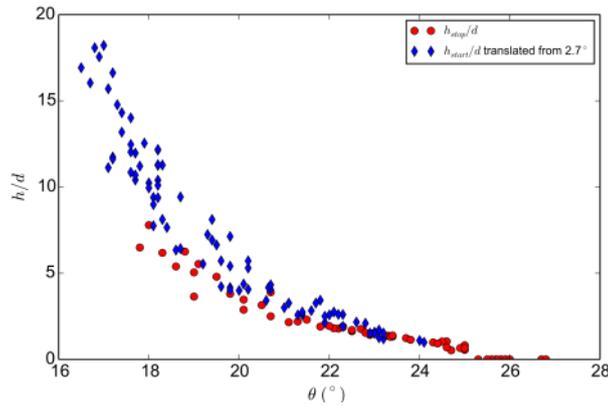
Tableau récapitulatif présentant les valeurs obtenues pour l'interpolation des données effectuée avec Matlab (M) ou Python (P). Les valeurs indiquées en rouge sont imposées lors de l'interpolation.

Dans un premier temps on peut constater qu'il n'a pas été possible d'interpoler correctement les séries de données  $h_{stop}$  correspondant à une méthode unique (Méthode 1 ou Méthode 2). En utilisant Matlab, on est contraint d'imposer une borne fixe pour l'un des paramètres afin d'obtenir un résultat. Avec Python, aucune interpolation n'a été possible. Si l'on considère en revanche les séries complètes de points, on se rend compte que les résultats obtenus sont globalement satisfaisants car les  $R^2$  sont proches de 1.

Pour la courbe  $h_{stop}$  les deux méthodes différentes utilisées donnent globalement les mêmes résultats, en tout cas chacun des paramètres reste contenu dans les écarts types respectifs. De plus les  $R^2$  sont supérieurs à 0.95 ce qui est satisfaisant. Il faut tout de même noter que le déficit de points pour les grandes valeurs de  $h/d$  conduit à une incertitude assez importante sur les valeurs de  $\theta_{\min}$  ( $\pm 1$ ).

Concernant la courbe  $h_{start}$ , on obtient dans les deux cas des valeurs précises des paramètres, des écarts types très faibles et des  $R^2$  élevés. Pourtant, les résultats obtenus sont assez différents selon la méthode d'interpolation utilisée. Deux différentes interpolations avec Python ont été réalisées en imposant des paramètres initiaux différents. Ceci conduit à des résultats différents selon que l'on interpole la courbe par le "haut" ou par le "bas". Cependant, les coefficients ne convergent pas vers des résultats similaires avec des paramètres initiaux différents.

Les courbes  $h_{start}$  et  $h_{stop}$  possédant le même facteur de forme  $B$  sont donc en théorie deux courbes translattées l'une par rapport à l'autre selon l'axe des abscisses, les paramètres  $(\theta_{\max} - \theta_{\min})$  et  $B$  étant conservés. En comparant les valeurs de  $B$ , elles semblent en effet conservées d'une courbe à l'autre dans une limite inférieure à l'écart type d'interpolation (à l'exception des deux courbes  $h_{start}$  interpolées avec Python). Pour le paramètre  $(\theta_{\max} - \theta_{\min})$  le calcul de la moyenne des différences pour les courbes de départ et d'arrêt donne de 11,7 et 14,4 pour  $h_{start}$  et  $h_{stop}$ , respectivement. Ces différences dépassent la variance commune de chaque paramètre. L'une des conclusions que l'on pourrait faire de cette observation est que les courbes ainsi interpolées ne sont pas homologues. Néanmoins, il est assez difficile de conclure sur cette affinité des courbes. Il pourrait venir d'un déficit de valeurs mesurées pour les  $h/d$  assez importants. Pour illustrer ce phénomène, la courbe  $h_{start}$  sur la figure suivante a été translattée de la différence moyenne identifiée entre les angles limites maximum (translation de tous les points expérimentaux  $h_{start}$  de 2.7).



Courbe  $h_{start}$  (bleu) traduite de 2.7 et  $h_{stop}$  (rouge)

Après analyse de la figure précédente, il semble difficile de conclure que les deux courbes soient réellement différentes du point de vue de leurs formes. Peut-être faudrait-il interpoler les points de chacune des deux courbes en même temps tout en optimisant un paramètre correspondant au déphasage.

G.D.R. Midi (2004). On dense granular flows. The European physical journal. E, 14(4) :1-26.

Pouliquen, O. and Renaut, N. (1996). Onset of granular flows on an inclined rough surface : Dilatancy effects. Journal of Physics, 6 :923-935.

- Application aux avalanches réelles

La détermination des positionnements des fronts de l'avalanche par stéréophotogrammétrie est décrite dans le rapport technique spécifique en annexe.

#### Extraction des paramètres de frottement basal

Nous avons conduit une extraction des paramètres de frottement basal pour une loi de type Voellmy ( $\mu, \xi$ ) pour laquelle la dépendance à la vitesse,  $v$ , s'exprime par :

$$\mu(v) = \mu_0 + \frac{g}{\xi} Fr^2,$$

Où  $\mu_0$  est le coefficient de frottement Coulombien,  $g$  l'accélération de la pesanteur,  $\xi$  le coefficient de frottement visqueux entre le corps de l'avalanche d'épaisseur  $h$  et l'air, et  $Fr$  le nombre de Froude défini par :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}.$$

Dans cette approche préliminaire à celle qui sera développée à l'issue de la thèse en cours de G. Pulfer, on ramène à un problème 2D en calculant un point équivalent aux fronts des avalanches identifiés par photogrammétrie. La figure suivante illustre comment les lignes gauches des fronts de l'écoulement sont transposées en centroïdes ponctuels par un calcul de type barycentre. Si on se ramène à un écoulement le long de la ligne de plus grande pente d'angle local  $\theta$  décrit par la seule variable abscisse curviligne  $c$ , l'équation du mouvement du bloc glissement de l'avalanche peut se formuler :

$$\frac{dv^2}{dc} = -\frac{2g}{\xi h} \cos\theta [\xi h (\tan\theta - \mu_0) - v^2].$$

Dans la zone accélérée de pente moyenne  $\theta_{acc}$  où  $\tan\theta_{acc} > \mu_0$ , la vitesse s'exprime en fonction de l'abscisse curviligne par :

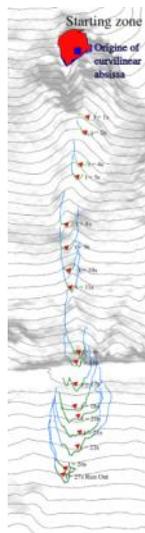
$$v(c) = \sqrt{\xi h (\tan\theta_{acc} - \mu_0)} \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{2g}{\xi h} \cos(\theta_{acc})c\right)}.$$

Réciproquement, dans la zone décélérée où l'avalanche entre à la vitesse  $v_e$  et où  $\tan\theta_{dec} < \mu_0$ , la vitesse s'exprime en fonction de l'abscisse curviligne par :

$$v(c) = \sqrt{-v_1^2 + (v_1^2 + v_e^2) \exp\left(-\frac{2g}{\xi h} \cos(\theta_{dec})(c - c_e)\right)},$$

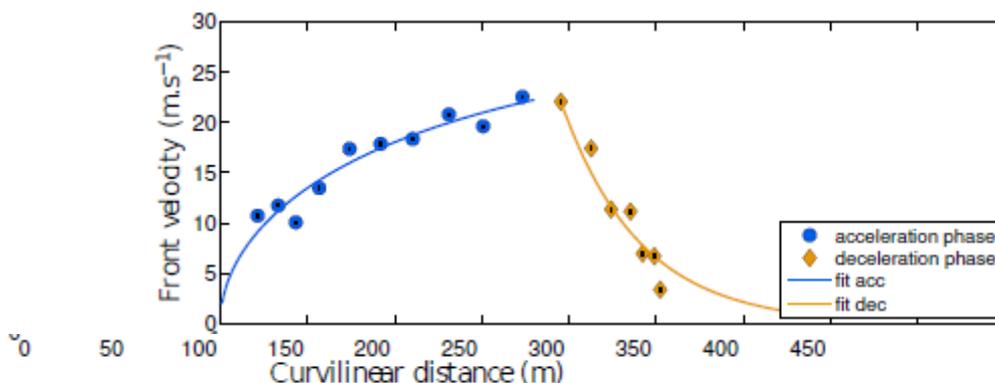
où  $v_1$  s'exprime cette fois par :

$$v_1 = \sqrt{\xi h (\mu_0 - \tan\theta_{dec})}.$$



Position des différents fronts de l'avalanche du 2 mars 2010. Seule la section verte des fronts est utilisée pour calculer la position figurée en rouge des centroïdes utilisés pour calculer les paramètres de frottement.

Pour l'avalanche du 13 février 2013, les paramètres ( $\mu$ ,  $\xi$ ) ont été extraits par ajustement des courbes donnant la vitesse en fonction de l'abscisse curviligne sur les mesures de vitesse des fronts d'avalanche ramenées un centroïde.

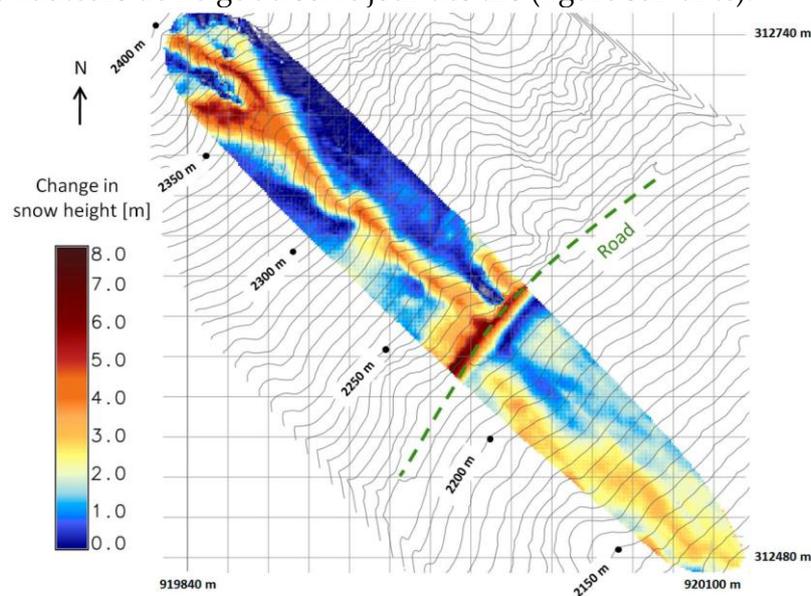


Vitesse du front de l'avalanche du 13 février 2013 et ajustement des lois de vitesses

Dans la zone accélérée, on identifie un coefficient  $\mu_0$  de 0.47, valeur assez élevée si l'on compare à celle attendue par l'étude de Naaim et al., (2013) dans nos conditions de températures mesurées pour la neige mobilisée, entre  $-4.7$  et  $-7.4^\circ\text{C}$ . Cette valeur est néanmoins cohérente avec la valeur de 0.42 prévue par Casassa et al., (1991) ajustée à nos conditions moyennes de température ( $-5^\circ\text{C}$ ). Également, cette valeur élevée est bien cohérente avec la forte érosion identifiée par le bilan de masse obtenu par laser scan (voir section suivante). Pour le produit  $\xi h$ , la valeur obtenue de 3300 est bien cohérente avec la seule valeur disponible pour ce même site d'étude, à savoir 4900 issue de l'étude Ancey et Meunier (2004) pour l'avalanche du 14 février 1979. D'autres avalanches sont en cours d'analyse avec ce traitement simple et préliminaire. Elles fourniront une base comparative lors de l'extraction des paramètres de frottement issus de la méthode d'optimisation inverse du modèle Saint-Venant mise au point sur le biplan.

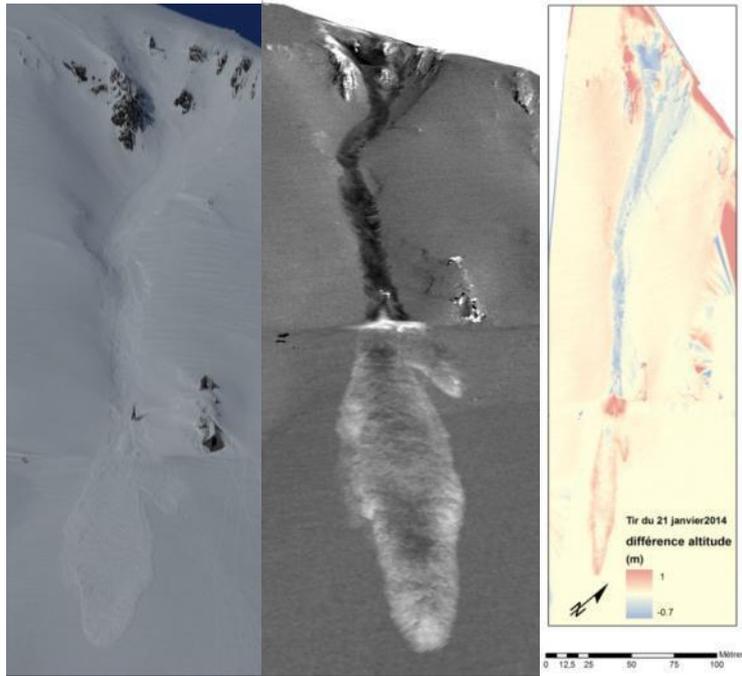
### Bilan de masse des avalanches

Le principe de cette mesure consiste à lever 2 MNT, un premier avant le déclenchement et un second après écoulement, de manière à obtenir par différence les volumes de départ, de dépôt et de reprise (érosion). La technique retenue pour réaliser ces levés de MNT est le lidar terrestre. Nous avons utilisé 2 appareils. Le premier un Riegl LPM-321, avec la collaboration d'A. Prokop (BOKU, Vienne) lors du tir du 13 Février 2013, puis l'Ilris LR de chez Optech, appareil de l'Université Joseph Fourier, pour les tirs réalisés à partir de l'hiver 2014. Les 2 appareils fonctionnent à une longueur d'onde spécifique à l'acquisition de MNT sur la neige et la glace (900 et 1064 nm respectivement pour le Riegl et l'Ilris). Nous avons également réalisés un MNT sol nul pour identifier les hauteurs de neige au sol le jour des tirs (figure suivante).

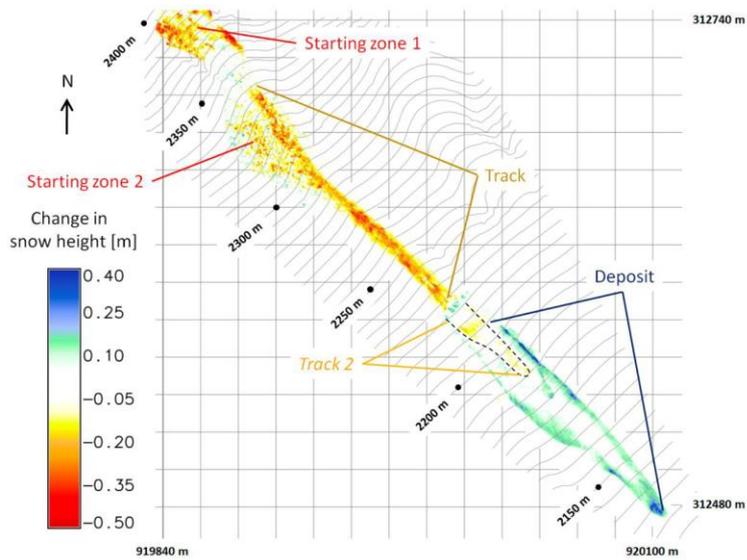


*Hauteur de neige au sol le jour du tir du 13 février 2013 obtenue par différence en le MNT lidar du Riegl et le MNT sol nu de l'Ilris du 24 octobre 2013 (Prokop et al. 2014).*

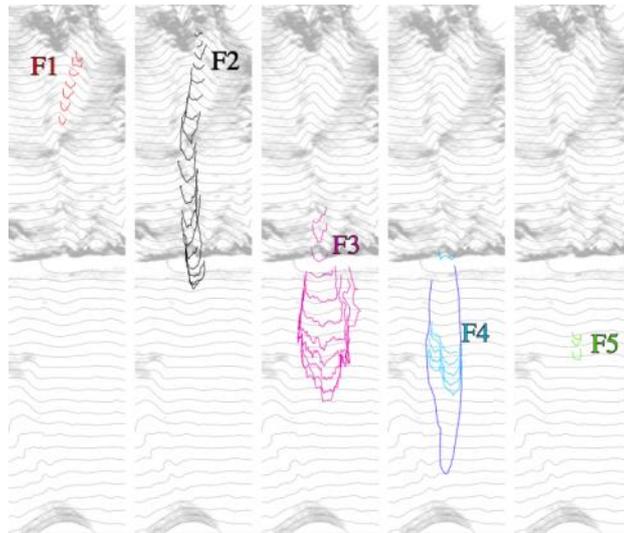
La figure suivante donne l'image du scan après tir du 21 janvier 2013.



Tir du 21 janvier 2014. Image visible après tir (à gauche), image de la scène lidar (au centre). A droite, évolution de l'épaisseur de neige le long du couloir 2.



Zone de départ, érosion et dépôt identifiés par les différence de MNT laser avant et après le tir du 13 février 2013 ( Prokop et al. 2014).



*Position des différents fronts d'avalanches : à gauche l'avalanche du 12 décembre 2012 où l'on peut distinguer 3 fronts différents (F1, F2, F3) et deux glissements de plaques (F4, F5). A droite l'avalanche du 13 Février 2013 où l'on peut distinguer 5 fronts différents (F1, F2, F3, F4 et F5).*

L'analyse du tir du 13 février 2013 montre que la zone de départ concerne un volume réduit de neige ( $142 \text{ m}^3$ ), et une surface de  $1190 \text{ m}^2$ . Il se rajoute un relativement important volume de reprise de  $283 \text{ m}^3$  le long des  $375 \text{ m}$  de l'écoulement. Le volume de neige déposée dans la zone d'arrêt est  $227 \text{ m}^3$ . Ceci donne un ratio de volume déposé/volume transporté de  $227/(142+283) = 1:1.87$ . L'indice massique de croissance de l'avalanche peut être quantifié à l'aide des densités de neige mesurées dans les zones de départ et d'arrêt (soit  $250$  et  $380 \text{ kg/m}^3$ , respectivement) et des volumes de départ et d'arrêt ( $142$  et  $227 \text{ m}^3$ ). On identifie ainsi un indice massique de  $2.4$  ( $86260/35500$ ), bien en accord avec la gamme  $1.8-8$  rapportée par Sovilla et Bartelt (2002). Cependant, le bilan de masse net indique une perte de masse de  $50760 \text{ kg}$  de neige le long de l'écoulement alors que le bilan volumique issu des mesures au laserscan ne fait apparaître essentiellement que de l'érosion dans le couloir. Cette incohérence est peut-être due à une sous estimation du volume de dépôt et une surestimation de la reprise : dans la zone d'arrêt comme dans le couloir, on fait l'hypothèse que le manteau neigeux (celui scanné avant l'avalanche) sous l'écoulement est inchangé, en particulier que sa densité demeure constante. Cette hypothèse est discutable. Il suffit en effet que sur la zone d'écoulement de  $5585 \text{ m}^2$ , la surface du manteau neigeux se soit affaissée d'environ  $3.5 \text{ cm}$  pour que cette perte d'épaisseur d'une densité de  $250 \text{ kg/m}^3$  soit interprétée comme une masse de neige érodée correspondant au déséquilibre du bilan de masse. En considérant que notre estimation de reprise de neige est correcte dans le couloir, si on considère un unique tassement du manteau neigeux dans la zone de dépôt ( $2715 \text{ m}^2$ ) où la neige est à  $380 \text{ kg/m}^3$ , une perte d'épaisseur de  $5 \text{ cm}$  est suffisante en zone d'arrêt pour expliquer le défaut de bilan de masse de  $50760 \text{ kg}$ .

Naaïm, M., Durand, Y., Eckert, N., Chambon, G., 2013. Dense avalanche friction coefficients: influence of physical properties of snow. *Journal of Glaciology* 59, 216. doi:10.3189 / 2013JoG12J205.

Casassa, G., Narita, H., Maeno, N., 1991. Shear cell experiments of snow and ice friction. *J. Appl. Phys.* 69(6), 3745-3756. doi:10.1063 / 1.348469.

Ancey, C., Meunier, M., 2004. Estimating bulk rheological properties of flowing snow avalanches from field data. *Journal of Geophysical Research* 109, 1-15.

Sovilla, B. and Bartelt, P., 2002. Observations and modelling of snow avalanche entrainment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2, pp. 169-179.

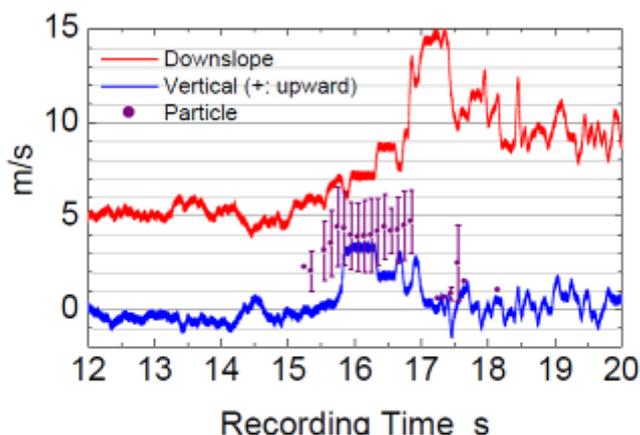
### A2.3 Cas particulier des avalanches de neige poudreuse

F. Naaim-Bouvet, H. Bellot, Y. Ito (Irstea)

Il n'existe actuellement que très peu de données permettant de valider hypothèses et sorties des modèles numériques d'avalanches de neige poudreuse (modèle bi-couche). Un anémomètre à ultrasons et un compteur de particules de neige ont été installés en 2013 dans le couloir du Lautaret. Ils ont permis l'enregistrement de premières données (vitesse de l'écoulement, vitesse des particules, taille des particules) lors du déclenchement du 10 avril 2013 (Ito et al., 2013) et du mars 2014. Ces résultats ont été partiellement présentés à l'ISSW2013 et un article incluant les données de l'hiver 2014 est en cours de rédaction et sera soumis à *Journal of Glaciology*.



*Anémomètre ultrasonique et Snow Particle Counter mis en place dans le couloir du Lautaret*



*Données obtenues lors de l'expérience du 10 avril 2013 : Vitesse du vent et des particules*

## ACTION 3 : Protection passive

### A3-1 Obstacle sur le site de P.te Seehore

Dans le cadre du projet DYNAVAL (INTERREG ALCOTRA), un obstacle métallique a été équipé avec différents capteurs.

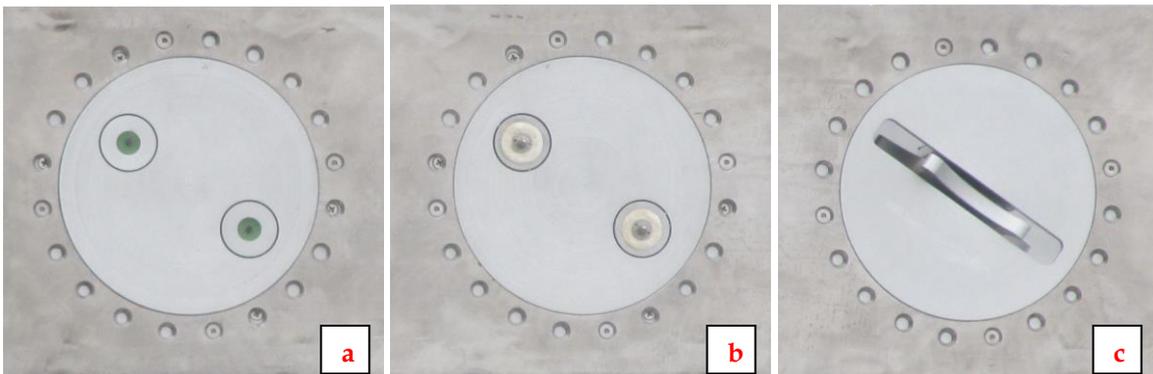
Des nouveaux capteurs de vitesse ont été conçus par le Polytechnique de Turin.

La conception des nouveaux capteurs a été réalisée en trois phases :

- la phase de conception et le développement des capteurs ;
- la phase de tests préliminaires ;
- la phase d'installation et mise en œuvre.

En 2013, sur l'obstacle des capteurs de vitesse ont été installés en collaboration avec le Politecnico de Turin en collaboration avec l'Instituto Superiore Mario Boella. En particulier, trois typologies de capteur de vitesse ont été installées :

- a) un capteur *ottico a correlazione*;
- b) un capteur *accelerometrico a correlazione*;
- c) un capteur *a ruota fonica*.



Pour l'installation sur l'obstacle, une structure spécifique a été conçue. L'alimentation des capteurs et le système de transmission des données ont été intégrés aux systèmes existants de l'obstacle.



*Obstacle avec les nouveaux capteurs de vitesse*

Pour la description des capteurs de vitesse, un rapport spécifique est annexé à ce rapport.

Afin de pouvoir améliorer la récolte des données concernant le dépôt et l'érosion du flux avalancheux en occasion d'un événement, la méthodologie du straw test a été modifiée, avec la substitution des cannes avec des tuyaux plus rigides de 16 mm de diamètre et 15 cm de longueur. Les tiges ont été dénommés « PIPE TEST ». Les pipelines alternent un tuyaux noir et un tuyaux jaune pour être visibles d'en bas du canal avalancheux. En outre, pour faciliter les opérations de récupérations des tuyaux, après un événement, nous avons installé à la base des pipelines une plaquette RECCO. A' la fin de novembre 26 pipeline ont été installées le long du canal avalancheux et autours l'obstacle.



*Installation des pipelines le 25.11.2013*

Pendant le déroulement du projet plusieurs évènements avalancheux se sont produits dans le site de la P.te Seehore. Le tableau suivant indique tous les évènements avalancheux qui se sont produits dans le site de la P.te Seehore.

Date	Avalanche release	Triggering method	Avalanche type	Impact to the obstacle
21/03/2012	Spontaneous		Dense	Yes
12/11/2012	Spontaneous			
30/11/2012	Artificially/triggered	Vassale	Mixed	Yes (no registration)
26/02/2013	Artificially/triggered	Vassale	Mixed	Yes (no registration)
18/03/2013	Spontaneous	Daisybell		Yes
19/03/2013	Artificially/triggered		Dense	no
17/04/2013	Spontaneous		Dense	Yes
24/04/2013	Spontaneous		Dense	Yes
29/04/2013	Spontaneous		Dense	Yes
30/05/2013	Spontaneous		Dense	Yes
26/12/2013	spontaneous			Yes (no registration)
20/01/2014	Artificially triggered + 1 spontaneous (!)	Vassale	mixed	yes
20/01-06/02/2014	2 Artificially triggered			no
06/02/2014	Artificially triggered	Vassale	mixed	Yes (no registration)
11/02/2014	Artificially triggered	Vassale	mixed	Yes (no registration)
28/02/2014-02/03/2014	Artificially triggered + 7 spontaneous (!)	Vassale	mixed	Yes
04/03/2014	Artificially triggered	Vassale	dense	no
24/04/2014 (* uncertain date)	Spontaneous	20.01 and 6.02		Yes (no registration)
28/04/2014-30/04/2014	3-4 Spontaneous (!)			yes

*Evènements dans le site de la P.te Seehore*

Pendant la saison hivernale **2011-2012** un seul événement naturel s'est produit au site de la P.te Seehore, le 21.03.2012, et a été enregistré par les capteurs installés sur le site.

Pendant la saison hivernale **2012-2013** plusieurs événements se sont produits le long du chenal du site de la P.te Seehore.

Pour chaque événement des relevés de terrain ont été réalisés. En particulier :

12.11.2012 : seulement les données enregistrés par les capteurs.

30.11.2012 :

- relèvement du contour de l'avalanche avec GPS ;
- définition de la hauteur de la neige dans le dépôt de l'avalanche;
- relèvement nivologique à 2420 m slm;
- analyse morphologique du dépôt de l'avalanche ;
- analyse de la densité du dépôt de l'avalanche et dimension des grains;
- caractéristique du dépôt près de l'obstacle.



*Dépôt à l'amont de l'obstacle*

26.02.2013 :

Pre-test:

- laser-scan (Ad Hoc );
- photogrammétrie par hélicoptère.

Post-test:

- relèvement du contour de l'avalanche avec GPS ;
- définition de la hauteur de la neige dans le dépôt de l'avalanche;
- relèvement nivologique et ECT à 2430 m slm (le long de la fracture);
- analyse morphologique du dépôt de l'avalanche ;
- analyse de la densité du dépôt de l'avalanche et dimension des grains;
- caractéristique du dépôt près de l'obstacle ;
- laser scan (Ad Hoc);
- photogrammétrie par hélicoptère;
- Straw Test.



*Profil nivologique et ECT à 2430 m snm*

18.03.2013:

- relèvement du contour de l'avalanche avec GPS ;
- définition de la hauteur de la neige dans le dépôt de l'avalanche;
- analyse morphologique du dépôt de l'avalanche ;
- analyse de la densité du dépôt de l'avalanche et dimension des grains;
- caractéristique du dépôt près de l'obstacle ;
- photogrammétrie par hélicoptère;
- enregistrement des données à l'obstacle.



*Dépôt de l'avalanche du 18.03.2013*

19.03.2013

Pre-test:

- photogrammétrie par hélicoptère.

Post-test:

- relèvement du contour de l'avalanche avec GPS ;
- définition de la hauteur de la neige et de la température dans le dépôt de l'avalanche;
- relèvement nivologique à 2.440 m slm;
- analyse morphologique du dépôt de l'avalanche ;
- analyse de la densité du dépôt de l'avalanche et dimension des grains;
- photogrammétrie par hélicoptère;
- Straw Test.



*Évènement du 19.03.2013*

17.04.2013:

- relèvement du contour de l'avalanche avec GPS ;
- définition de la hauteur de la neige dans le dépôt de l'avalanche;
- analyse morphologique du dépôt de l'avalanche ;
- analyse de la densité du dépôt de l'avalanche et dimension des grains;
- caractéristique du dépôt près de l'obstacle ;
- photogrammétrie terrestre (pour application dans méthodologie Ad Hoc);
- enregistrement des données à l'obstacle.



*Évènement du 17.04.2013*

24.04.2013

Pre-test:

- photogrammétrie par hélicoptère.

Post-test:

- relèvement du contour de l'avalanche avec GPS ;
- analyse morphologique du dépôt de l'avalanche ;
- analyse du manteau neigeux ;
- caractéristique du dépôt près de l'obstacle (événement du 19.04.2013);
- enregistrement des données à l'obstacle.



*Dépôt de neige à l'amont et à l'aval de l'obstacle*

29.04.2013:

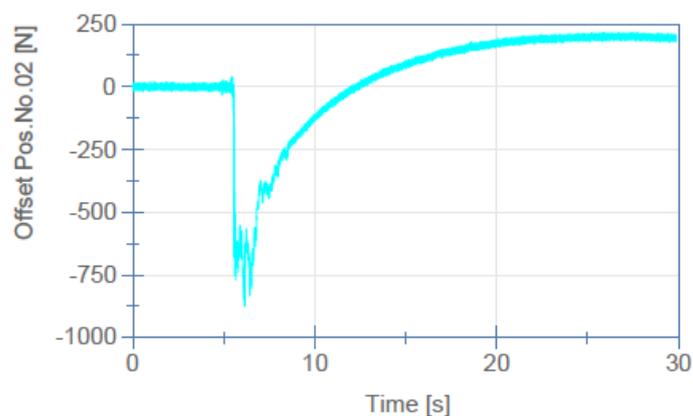
- relèvement du contour de l'avalanche avec GPS ;
- définition de la hauteur de la neige le long de l'avalanche;
- analyse morphologique du dépôt de l'avalanche ;
- analyse de la densité du dépôt de l'avalanche ;
- caractéristique du dépôt près de l'obstacle ;
- photogrammétrie terrestre (pour application dans méthodologie Ad Hoc);
- enregistrement des données à l'obstacle.



*Relèvements de terrain*

30.05.2013:

- enregistrement des données à l'obstacle.



Dans la période 14.02.2013 au 20.06.2013, l'obstacle à enregistré plusieurs données.

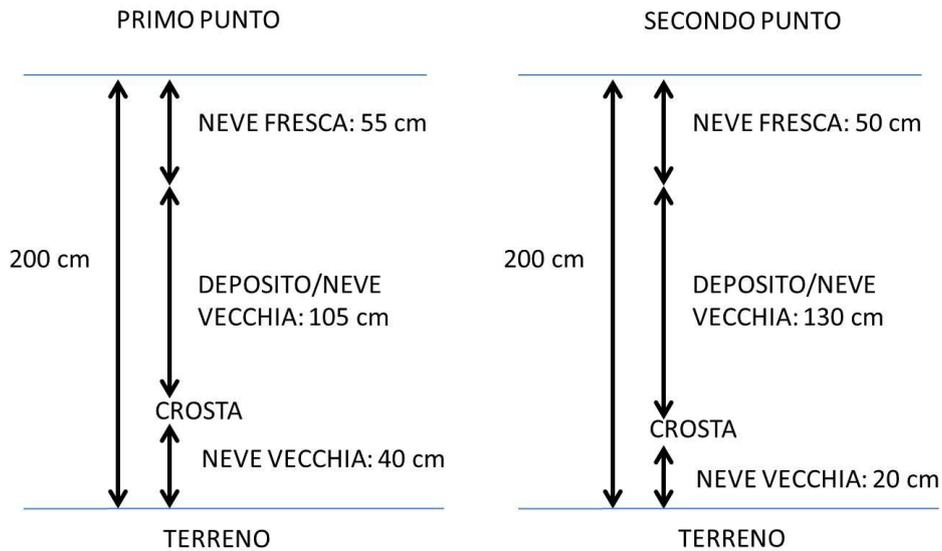
INDICE	DATA_ORA	INDICE	DATA_ORA	INDICE	DATA_ORA
1	20130214_133757	19	20130407_143239	37	20130513_110556
2	20130311_115100	20	20130411_150359	38	20130513_113957
3	20130311_115350	21	20130412_111616	39	20130529_092703
4	20130311_124030	22	20130415_145102	40	20130530_135928
5	20130311_125146	23	20130416_015854	41	20130530_195146
6	20130311_130116	24	20130417_173007	42	20130531_132102
7	20130311_132545	25	20130424_093014	43	20130531_135356
8	20130311_153305	26	20130424_100144	44	20130601_174006
9	20130313_234700	27	20130424_100806	45	20130603_162439
10	20130318_000643	28	20130424_161952	46	20130604_185728
11	20130318_152950	29	20130429_124418	47	20130604_195616
12	20130325_153555	30	20130502_092416	48	20130605_200217
13	20130325_160135	31	20130502_093102	49	20130606_234908
14	20130327_114739	32	20130502_093202	50	20130611_184938
15	20130328_143556	33	20130502_093748	51	20130612_163958
16	20130330_134329	34	20130502_095641	52	20130613_035435
17	20130330_150135	35	20130507_110654	53	20130620_025041
18	20130403_205348	36	20130509_231033		

Pendant la saison hivernale **2013-2014** plusieurs événements se sont produits le long du canal du site de la P.te Seehore :

Pour chaque événement des relevés de terrain ont été réalisés. En particulier :

26.12.2013 :

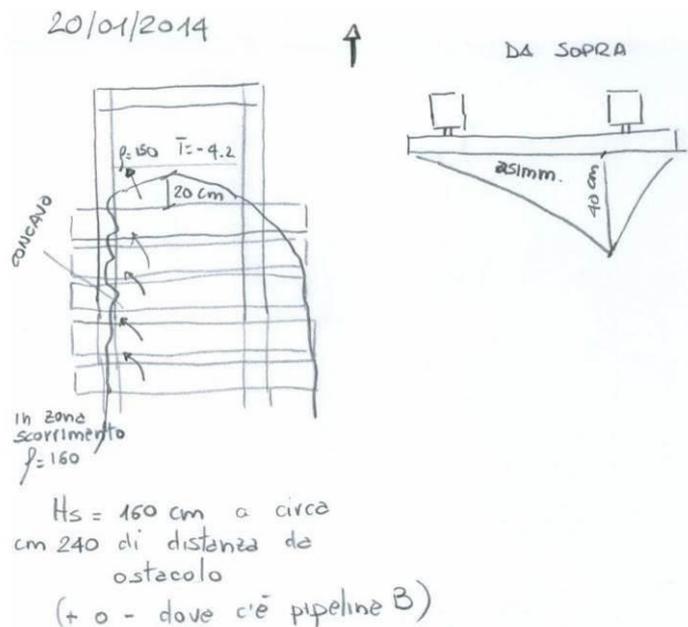
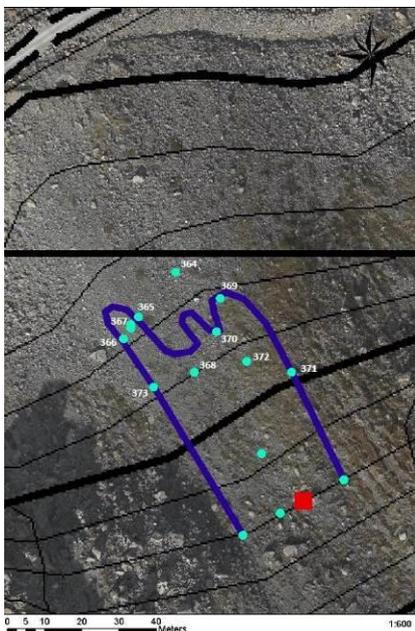
- hauteur de la neige dans le dépôt de l'avalanche;
- densité de la neige dans le dépôt de l'avalanche;
- analyse de la straw test Z dans la zone de dépôt de l'avalanche.



*Relèvements dans la zone de dépôt de l'avalanche*

20.01.2014 :

- relèvement du contour de l'avalanche avec GPS ;
- définition de la hauteur de la neige le long de l'avalanche;
- relèvement nivologique à 2410 m slm;
- analyse morphologique du dépôt de l'avalanche ;
- analyse de la densité du dépôt de l'avalanche ;
- caractéristique du dépôt près de l'obstacle ;
- enregistrement des données à l'obstacle ;
- analyse des straw/pipe tests.



*Runout de l'avalanche et relèvements autour de l'obstacle*

06.02.2014 :

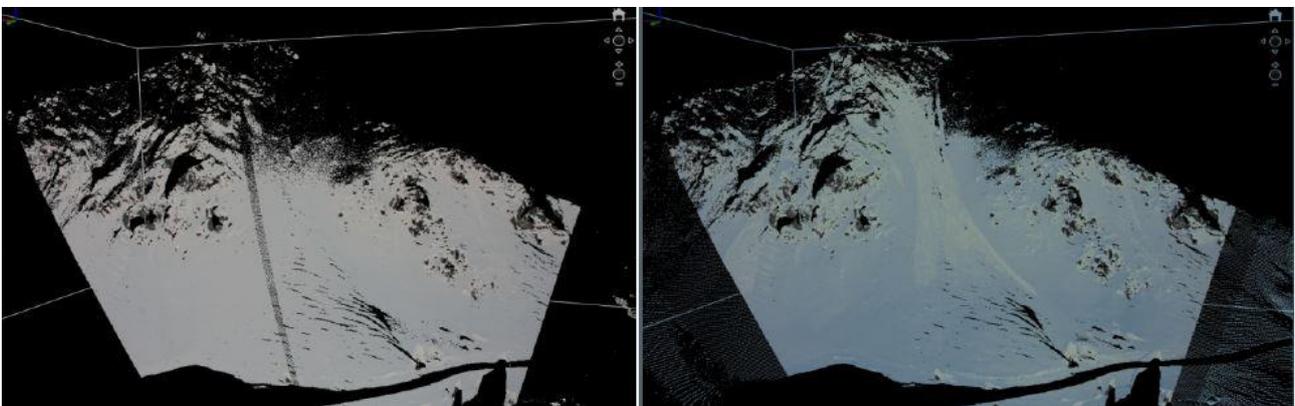
- relèvement du contour de l'avalanche avec GPS ;
- définition de la hauteur de la neige le long de l'avalanche;
- relèvement nivologique à 2480 m slm;
- analyse morphologique du dépôt de l'avalanche ;

- analyse de la température du dépôt de l'avalanche ;
- caractéristique du dépôt près de l'obstacle ;
- relèvements laserscanner ;
- analyse des straw/pipe tests.



A		
Hs		
255		A1-7
240		A2-7
225		A3-7
210		A4-7
195		A5-7
180		A6-7
165		A7-7
150		A8-7
135		A9-7
120		A10-7
105		A5-5
90		A6-5
75		A5-4
60		A4-inst
45		A3-inst
30		A2-inst
15		A1-inst

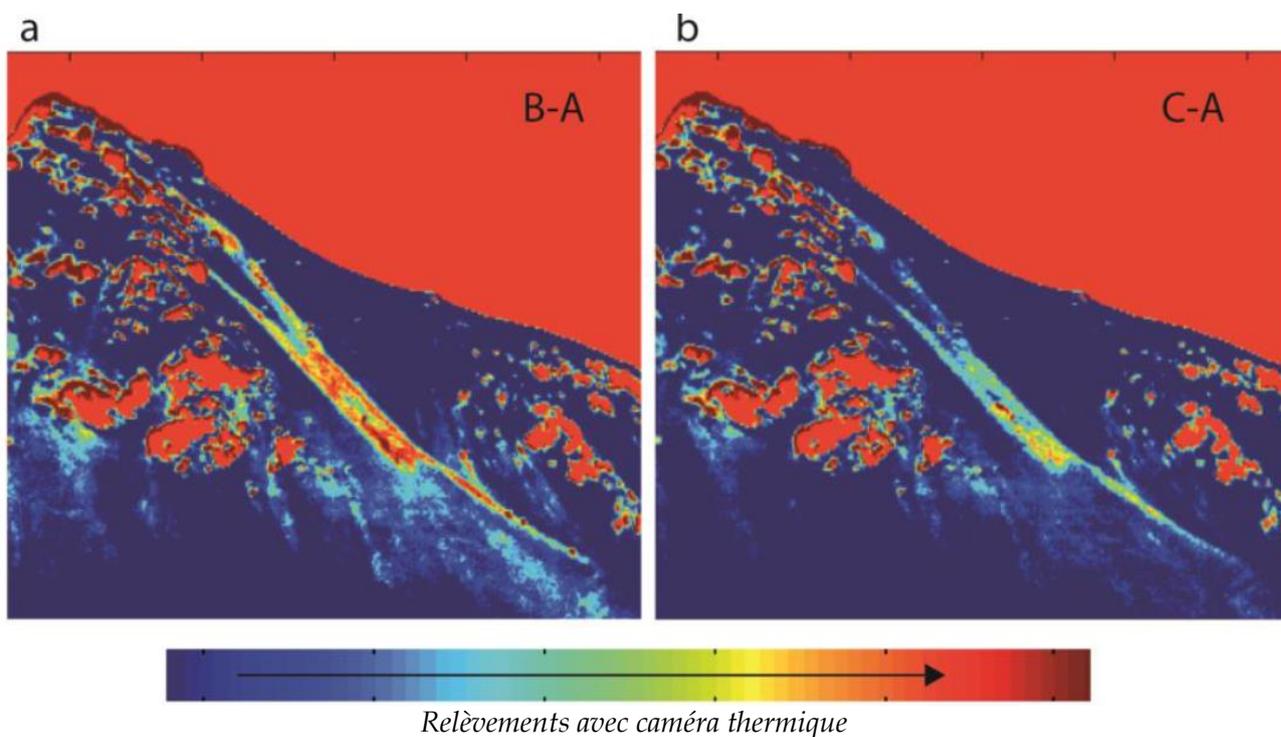
*Relèvements de la zone du dépôt et straw test A*



*Relèvements laserscanner avant et après l'évènement*

11.02.2014 :

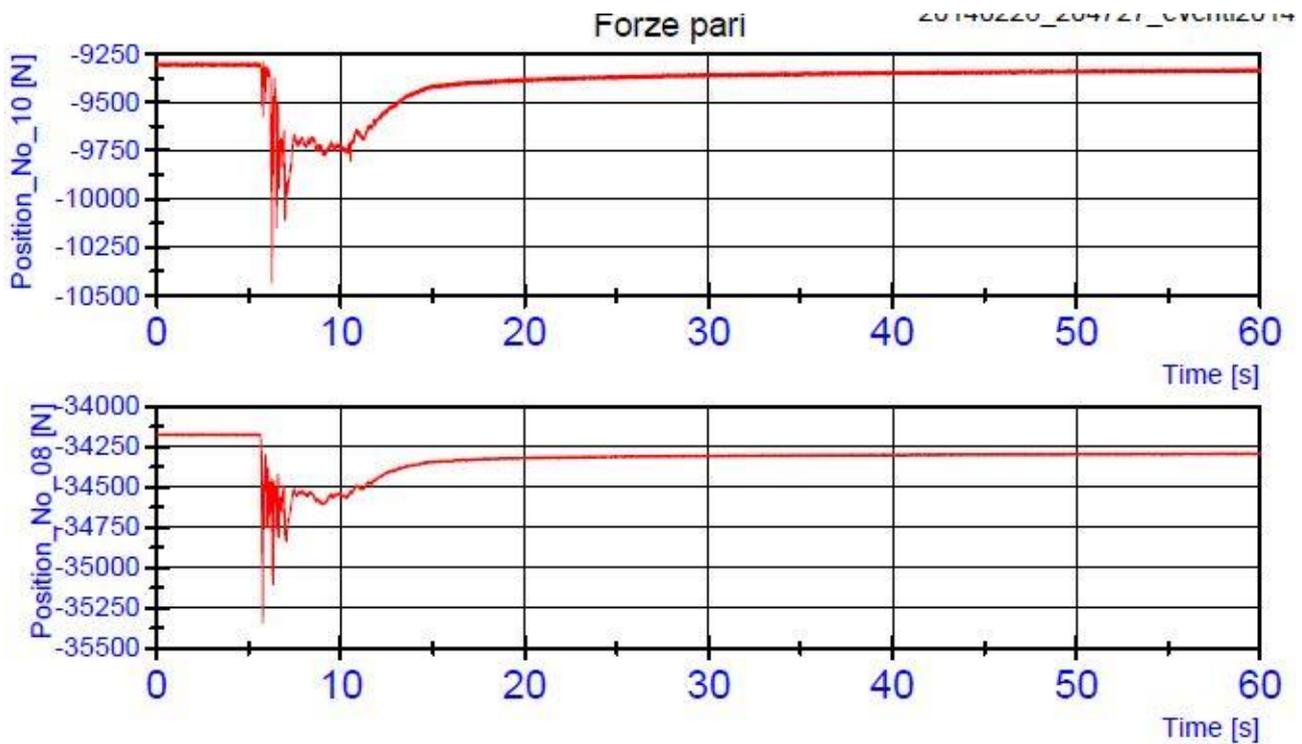
- relèvement du contour de l'avalanche avec GPS ;
- définition de la hauteur de la neige le long de l'avalanche;
- relèvement nivologique à 2500 m slm;
- analyse morphologique du dépôt de l'avalanche ;
- température du dépôt de l'avalanche avec caméra thermique;
- caractéristique du dépôt près de l'obstacle ;
- analyse des straw/pipe tests.



02.03.2014 :

- relèvement du contour de l'avalanche avec GPS ;
- analyse morphologique et de densité du dépôt de l'avalanche ;
- caractéristique du dépôt près de l'obstacle ;
- analyse du straw/pipe test B ;
- enregistrement par les capteurs de l'obstacle.





04.03.2014 :

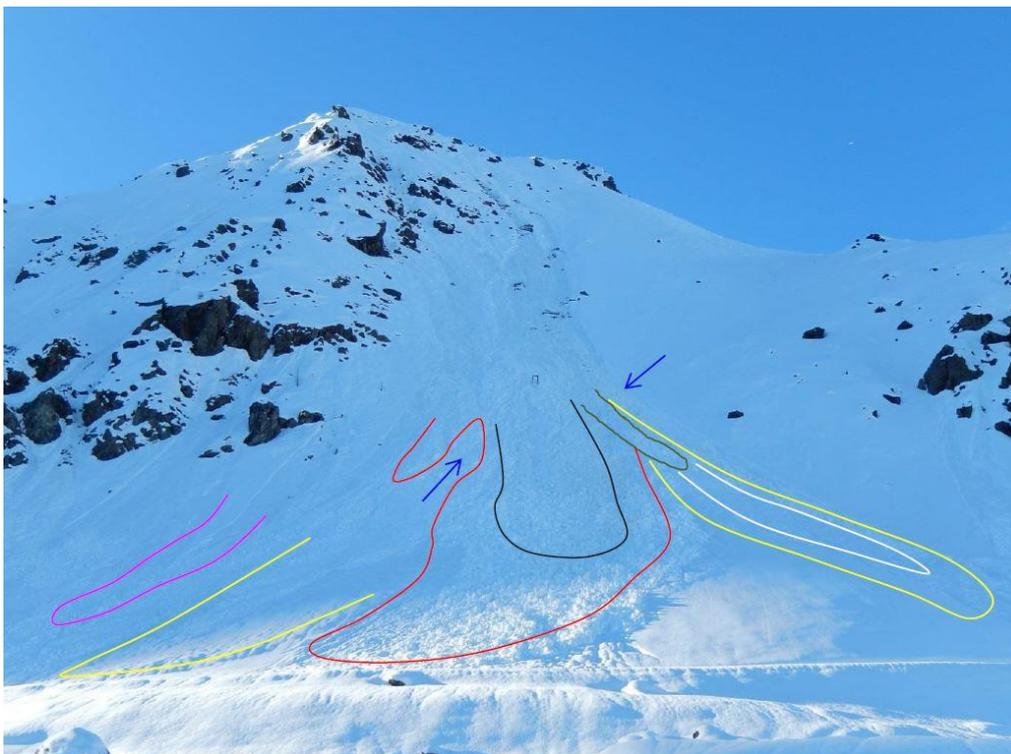
De cet évènement on n'a pas fait de relèvement.



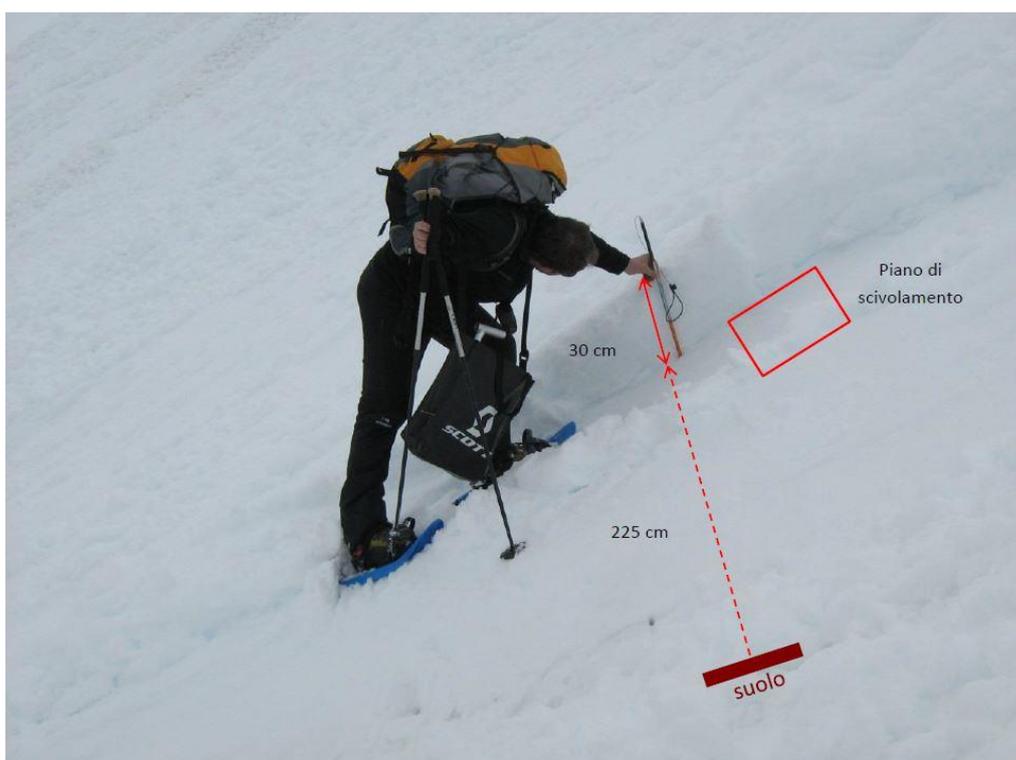
*Avalanche du 04.03.2014*

27.04/30.04.2014 :

- relèvement du contour de l'avalanche avec GPS ;
- définition de la densité de la neige le long de l'avalanche;
- relèvement nivologique en dehors de la zone d'écoulement;
- analyse morphologique du dépôt de l'avalanche ;
- caractéristique du dépôt près de l'obstacle.



*Evènements entre 27.04 et 30.04*



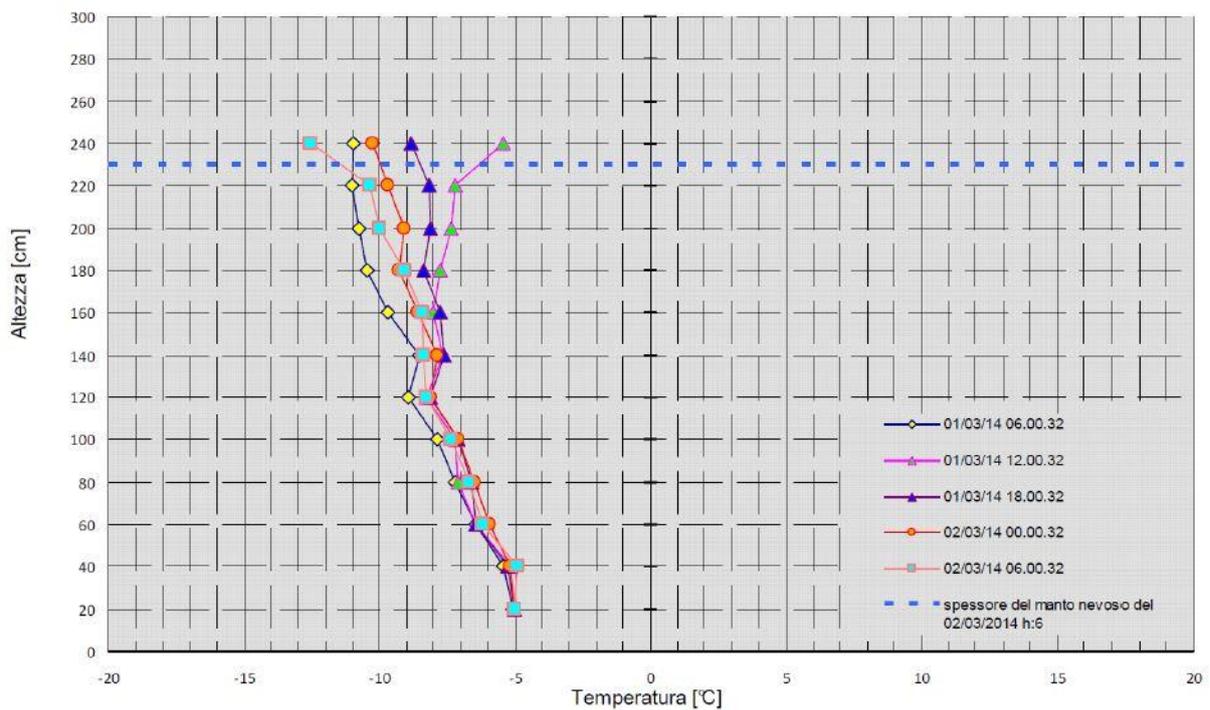
*Relèvements suite aux évènements*

Pour tous les tests réalisés au site de la P.te Seehore, un rapport spécifique a été rédigé. Ces rapports sont annexés au rapport technique général.

Afin d'améliorer le suivi du site de la P.te Seehore, un poteau instrumenté a été installé dans la zone de départ des avalanches. Cet instrument, dénommé NIVEXC, été réalisé par la Flow-Ing de La Spezia et permet d'avoir les mesures de la hauteur de la neige et de la température chaque les six heures. Cet instrument est équipé pour la mesure de la température et la hauteur de la neige chaque 10 cm.

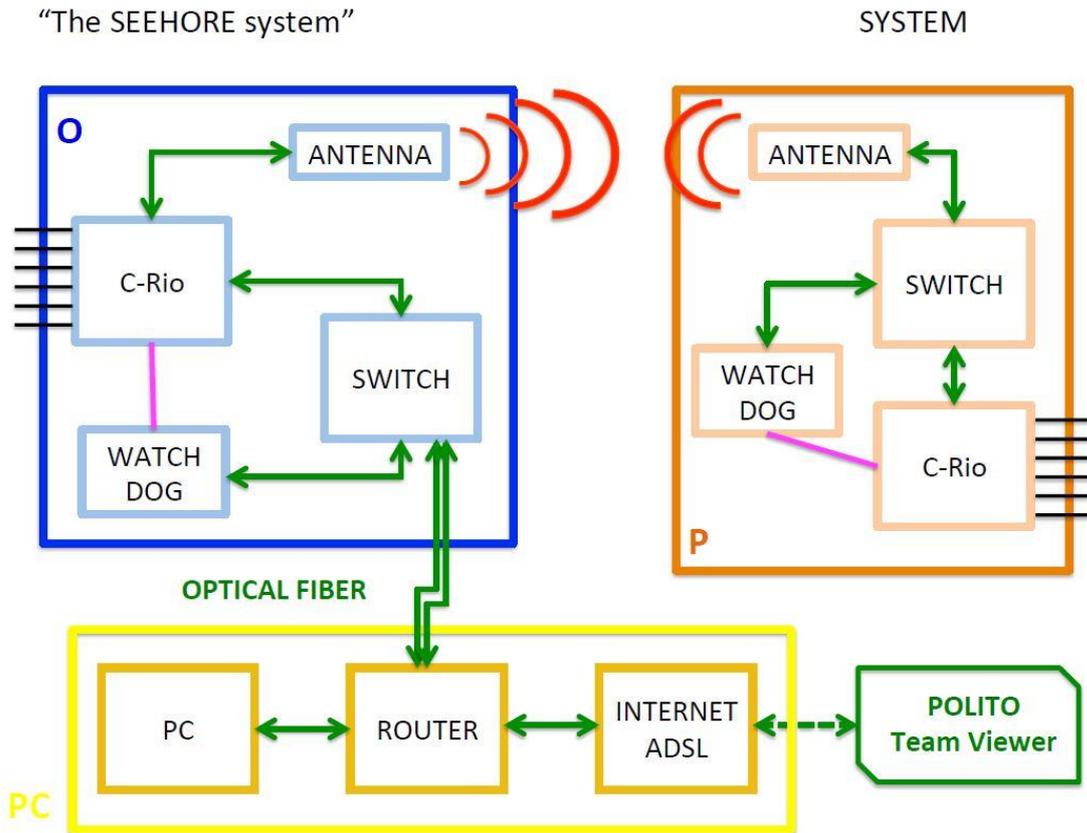


Position de la NIVEXC



Profil de température enregistré par la NIVEXC

Pendant l'été 2014, afin d'améliorer le système de acquisition et de transmission des données, un watch dog a été installé. En outre, le switch a été remplacé par un autre plus performant.



Enfin, pour permettre un meilleur suivi des évènements du site une web cam a été installée sur la structure métallique de l'obstacle.



Installation de la web cam et entretien du système obstacle

Le 12 novembre 2014 une avalanche, déclenchée naturellement, a emporté l'obstacle et a causé des dommages aux capteurs installés le long du canal avalancheux. Une bonne partie des instruments installés ont été perdus sous la neige. Suite à plusieurs missions sur le terrain on a cherché

d'évaluer le fonctionnement des capteurs récupérés et de l'obstacle métallique, afin de pouvoir réinstaller la structure métallique déjà pendant la saison hivernale 2014-2015. Pour pouvoir procéder aux évaluations techniques et économiques la structure métallique a été transporté au fond de la vallée, à Staffal, par l'hélicoptère. Les évaluations sont en cours.



*Avalanche du 12.11.2014 et position de l'obstacle*



*L'obstacle à Staffal*

### A3-2 Tas freineur sur le site de Tacconnaz

H. Bellot, F. Naaim-Bouvet, M. Naaim, T. Faug, P. Caccamo (Irstea)

Dans le cadre du projet DYNAVAL (INTERREG ALCOTRA) 3 tas freineurs du couloir paravalanche de Tacconnaz ont été équipés chacun de deux capteurs de vitesse et de deux capteurs de pression. Le suivi du couloir se poursuit dans le cadre de MAP3. La consultation des données à distance a été mise en place et est opérationnelle. Lors de l'hiver 2012, deux avalanches consécutives se sont produites dans le couloir mais se sont arrêtées à 1 m du tas le plus haut du couloir.



*Couloir de Tacconnaz et dispositif expérimental*



*Tas freineur équipé de deux capteurs de pression et de vitesse*



*Le 8 février 2012 : les capteurs n'ont pas été atteints*

Lors de l'hiver 2012-2013, l'avalanche s'est produite en fin de saison, le 12 avril 2013, la partie poudreuse de l'écoulement atteignant la route internationale. L'avalanche dense a été contenue dans le dispositif. Un seul capteur de pression a fonctionné. Un relevé lidar a été effectué. En septembre 2014, un second relevé lidar, sol nu, a été réalisé.



*Le 12 avril 2013 : les capteurs n'ont pas été atteints*

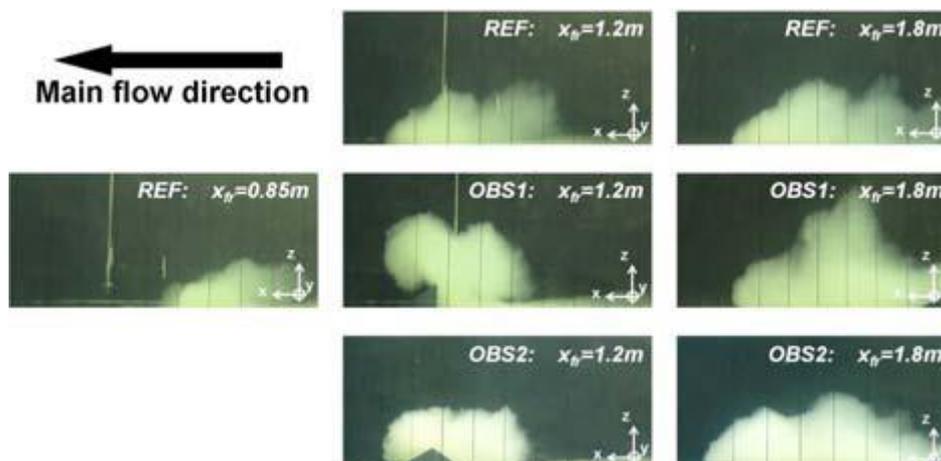
Les résultats obtenus sur le site de Taconnaz ont été exploités dans la thèse de P. Caccamo (Caccamo, 2012) et présentés lors de l'ISSW2013 (Bellot et al., 2013). Un article incluant les données de 2013 est en cours de préparation et sera soumis à Journal of Glaciology. 5 capteurs de pression ont été endommagés et ont été réparés début 2014.

### A3-3 Modélisation physique de l'interaction écoulement/obstacle

En complément des mesures de terrain, nous développons des formules analytiques pour prédire la pression exercée par les avalanches sur les obstacles. Ces formulations principalement basées sur l'analogie des écoulements de neige dense avec les écoulements granulaires sont calibrées et validées par des simulations numériques discrètes et des tests de laboratoire à échelle réduite, avant d'être confrontées aux mesures de terrain (sites expérimentaux du Lautaret et de Taconnaz en particulier). Lors du projet DYNAVAL, l'effort a été porté sur les écoulements impactant un obstacle de type digue dont les principaux résultats sont décrits dans (Faug et al., GRL 2012) et plusieurs références dans cet article. Dans le cadre du projet MAP3, nous portons l'effort sur des géométries d'obstacles de type pylônes. Un nouveau modèle de force sur un obstacle étroit a été proposé (Faug, AIP 2013) et est en cours de validation sur un grand nombre d'expériences granulaires déjà existantes. Les prédictions seront également comparées aux mesures de force sur la plaque du Lautaret.

Les travaux mentionnés ci-dessus concernent la force moyenne sur l'obstacle. Nous développons actuellement de nouvelles investigations pour comprendre les fluctuations de force, toujours sur la base de l'analogie des écoulements de neige dense avec les fluides granulaires. Ces fluctuations de force sont aujourd'hui considérées comme un verrou important pour le dimensionnement structural des ouvrages de protection paravalanche.

L'influence de la dynamique des avalanches poudreuses sur des obstacles a été étudiée en bassin noyé. Les avalanches ont été modélisées par des bouffées de densité constituées par un volume fini d'eau salée s'écoulant dans de l'eau pure le long d'un canal immergé dans un bassin noyé. Une vélocimétrie acoustique à haute résolution a permis d'étudier les vitesses 3D. L'avalanche de référence a ainsi été caractérisée puis l'influence de deux types d'obstacles sur cette avalanche de référence a été étudiée. Les obstacles correspondaient à des digues d'arrêt, l'une avec une face amont verticale, l'autre avec une face amont inclinée. Ces expériences ont permis de montrer et de quantifier l'effet de rampe provoquée par la face amont inclinée par rapport à la face amont verticale (Caccamo et al., 2013).

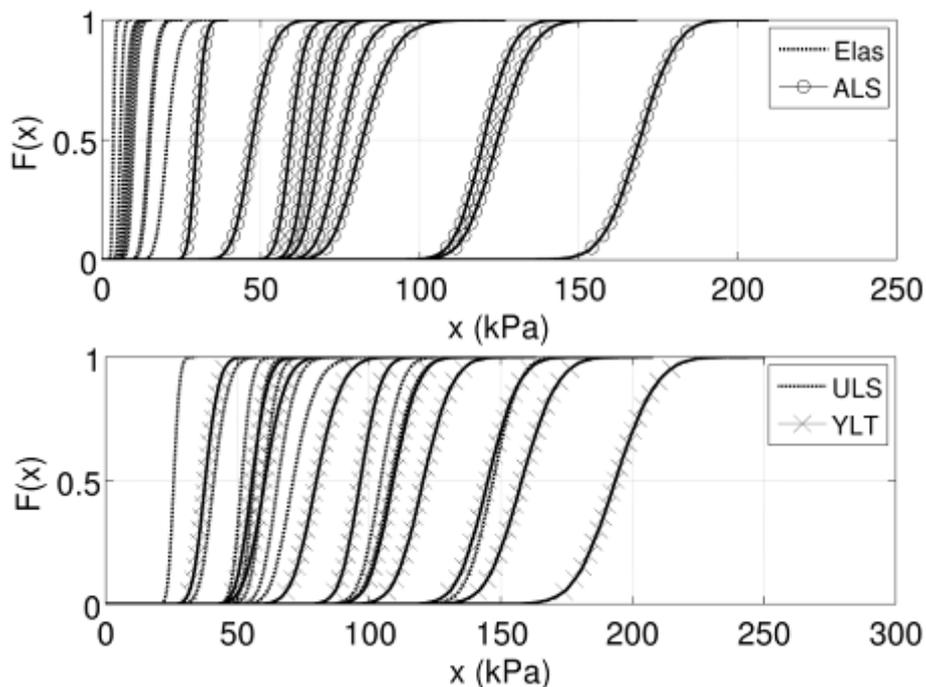


### A3-4 Vulnérabilité des structures en béton armé exposées à des flux avalanchements

Le projet MAP3 a permis, en lien avec le projet ANR MOPERA (<http://www.avalanches.fr/mopera-projet/>) l'embauche d'une doctorante, Philomène Favier, dont le sujet traite de la vulnérabilité des structures en béton armé exposées à des flux avalanchements et de l'évaluation du risque dans un contexte décisionnel.

Dans ce travail, la vulnérabilité d'une structure en béton armé (BA) exposée à un flux avalanchement d'intensité donnée est caractérisée par sa probabilité de défaillance. Plusieurs critères de défaillance ont été retenus et permettent de décrire l'état de dégradation globale de la structure. Avec cette approche, des structures de géométries complexes et dont les matériaux constitutifs peuvent développer des non-linéarités ont été étudiées. Une étude fiabiliste a été menée pour prendre en compte les incertitudes liées à la géométrie et/ou la résistance.

Dans un premier temps, la capacité de résistance de la dalle a été estimée à partir d'une méthode analytique (théorie des lignes de rupture). Un modèle basé sur les abaques de génie civil a été développé et permet de décrire le comportement d'une dalle en BA jusqu'à son état ultime. Pour l'heure, le comportement mécanique de la dalle est supposé élastique. La capacité de résistance ultime de la dalle a été estimée à partir de la méthode analytique de la théorie des lignes de rupture. En utilisant la limite élastique du béton, les limites ELU et ELA (respectivement, ULS et ALS en anglais) basées sur les Eurocodes, et la ruine définie par la théorie des lignes de rupture, un panel de courbes de fragilité peut être construit (a).

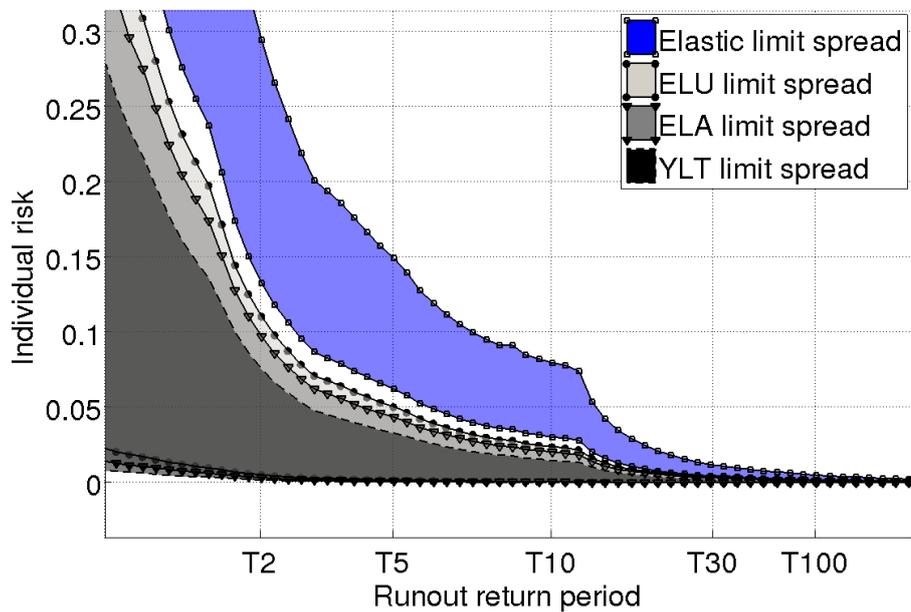


a- Courbes de fragilité établies par analyse fiabiliste pour dix configurations de mur en béton armé et quatre états limites considérés (Elas : limite élastique, ALS : état limite accidentel, ULS : état limite ultime, YLT : ruine).

Cette méthode analytique a permis la mise en place de courbes de fragilité qui offre une approche systématique pour l'évaluation de la vulnérabilité structurelle de différents types de structures. Ces courbes de fragilité influencent d'une part le calcul de risque et d'autre part l'optimisation des moyens de protection contre les avalanches effectuée dans un cadre décisionnel : en suivant le cadre défini par Eckert et *al.*, 2010 pour le calcul de risque ainsi qu'en utilisant des sorties de modèles hydrauliques couplés statistiques développés au sein de l'équipe ETNA, on peut propager les résultats de fragilité précédemment développés dans un outil de risque. Une étude de sensibilité très poussée a ainsi été réalisée, permettant de définir des bornes utiles à la pratique de

l'ingénierie (b).

Dans un second temps, un modèle numérique basé sur la théorie des éléments finis a été développé. Il permet de décrire de manière plus fine le comportement d'une dalle BA jusqu'à son état ultime.



*b - Influence de la vulnérabilité sur le calcul de risque.*

Parallèlement, des travaux théoriques concernant le zonage paravalanche ont été menés. Ceux-ci visent à mieux décrire les procédures de zonage au travers du cadre formel de la statistique décisionnelle.

## **ACTION 4** : Valorisation des résultats et divulgation

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet ont été présentés lors de conférences et par la publication d'articles scientifiques.

Le livre grand public Risques naturels en montagne a été écrit et transmis à l'éditeur Quae ([www.quae.com](http://www.quae.com)) en janvier 2015. Sa parution est prévue en septembre 2015. Le sommaire est le suivant. Les illustrateurs sont Cled'12, Graphies et Anne-Claire Lecomte.

Risques Naturels en montagne  
Ouvrage collectif sous la direction de Florence Naaim-Bouvet et Didier Richard



Sommaire

La montagne et le risque (*coordination : E. Marcelpoil et D. Richard*)

C'est quoi le risque ?

La montagne, terre de grands espaces ou de grands aménagements ?

Montagne récréative ou dangereuse ?

Qu'est-ce qui est différent en montagne ?

Qu'est-ce qu'on risque ?

Qui s'occupe des risques ?

Depuis quand s'occupe-t-on du risque naturel en montagne ?

Comment savoir ce que l'on risque ?

**Risques glaciaires** (*coordination : E. Thibert*)

Comment naissent les glaciers ?

Crevasses et séracs : comment se forment-ils ?

Changement climatique : vers une mort annoncée des glaciers ?

La glace comme origine des risques glaciaires : quelques événements historiques

Le rôle de l'eau dans les risques glaciaires : quelques événements historiques

Est-il possible de mener des actions préventives pour limiter les risques glaciaires ? Quelques exemples d'actualité

Risques glaciaires et changement climatique : y-a-t-il un lien ?

**Neige et avalanches** (*coordination : F. Naaim-Bouvet*)

Avalanches de neige en quelques chiffres  
La neige en voit de toutes les couleurs  
Y-a-t-il une mémoire des avalanches ?  
Où sont les neiges et avalanches d'antan ?  
Le manteau neigeux : une mille-feuille glacée  
Le déclenchement des avalanches : une histoire de forces  
Peut-on prévoir les avalanches ?  
Comment déclencher artificiellement une avalanche ?  
Pourquoi les montagnes fument-elles et en quoi est-ce dangereux ?  
Une avalanche peut en cacher une autre  
De l'eau du sel et des grains pour modéliser les avalanches  
Les avalanches en équation  
Chercheur d'avalanches : un métier à risque ?  
Sait-on construire des bâtiments qui résistent aux avalanches ?  
Forêt de protection : mythe ou réalité ?  
Comment empêcher le départ d'une avalanche ?  
Comment arrêter ou dévier une avalanche ?  
Y-aurait-il des tsunamis en montagne ?  
Le couloir d'avalanche de Tacconnaz et son paravalanche emblématique

### ***Erosion torrentielle (coordination : D. Laigle)***

Les torrents, quelques généralités  
Charriage ou suspension ?  
Quand les torrents font des laves  
Au fil de l'eau, de la montagne à la plaine : quand les torrents dessinent le paysage  
Quand les rivières perdent l'équilibre !!  
Comment mesurer les crues en montagne pour mieux les prévoir  
Quand les scientifiques jouent aux billes pour modéliser les torrents  
Laves torrentielles et cosmétiques : un air de famille ?  
Pour maîtriser l'érosion, il suffit parfois d'un trait de génie... biologique !  
Les activités humaines modifient-elles le fonctionnement des torrents ?  
Torrents et changements climatiques  
Quels impacts sur les enjeux humains ?  
Des barrages de correction torrentielle qui ne retiennent pas que de l'eau...  
Les crues torrentielles du massif de Belledonne en 2005  
La lave torrentielle du 22 août 2005 sur le Nant d'Armancette

### ***Mouvements de pente (coordination : D. Hantz)***

Qu'est-ce qu'un mouvement de pente  
Quelques chiffres  
Pourquoi les montagnes sont-elles érodées ?  
Quels sont les mécanismes des mouvements de versant ?  
La décompression et le fluage  
Le glissement  
Comment étudier la stabilité d'une pente susceptible de glisser ? (un peu de mécanique)  
Pourquoi une pente glisse-t-elle et comment l'en empêcher ?  
Peut-on prévoir les glissements ?  
Le basculement  
Chute, éboulement et écoulement  
Écoulement

### ***Chute de blocs et éboulements (coordination : S. Lambert)***

Chute de blocs et éboulements – définition et événements marquants  
Fréquence des chutes de roche  
Pourquoi les rochers tombent-ils ?  
Tout en haut des montagnes : des risques accrus par le réchauffement climatique?

Ils chutent, rebondissent, roulent ou glissent  
Mais où s'arrêtera-t-il ?  
La mémoire des événements pour l'évaluation des risques  
100 % des pierres arrivés en bas se sont détachés  
Des arbres contre les chutes de blocs  
Comment s'en protéger ?  
Pas vraiment des filets à papillons  
Oh le gros merlon !  
Les gorges de la Bourne : des surplombs rocheux sous contrôle

## ARTICLES

**Barbero M., Barpi F., Borri Brunetto M., Bovet E., Chiaia B., De Biagi V., Frigo B., Pallara O., Maggioni M., Freppaz M., Ceaglio E., Godone D., Viglietti D., Zanini E.** - 2012. A new experimental snow avalanche test site at Seehore peak in Aosta Valley (NW Italian Alps) - Part II: engineering aspects. *Cold Regions Science and Technology*. doi 10.1016/j.coldregions.2012.10.014.

**Faug, T., Caccamo P., Chanut B.**- 2012. A scaling law for impact force of a granular avalanche flowing past a wall, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L23401, doi:10.1029/2012GL054112.

**Favier, P., Bertrand, D., Eckert, N., Naaim, M.** (2014). A reliability assessment of physical vulnerability of reinforced concrete walls loaded by snow avalanches. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussion*. 1, pp 689 -704.

**Favier, P., Eckert, N., Bertrand, D., Naaim M.**, (2014). Sensitivity of avalanche risk to vulnerability relations, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 108, pp. 163-177

**Gaume J., Chambon G., Eckert N., Naaim M.** Relative influence of mechanical and meteorological factors on avalanche release depth distributions: An application to French Alps, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L12401, 2012.

**Gaume J., Chambon G., Eckert N., Naaim M.** - 2013. Influence of weak layer heterogeneity on slab avalanche release: Application to the evaluation of avalanche release depths. *Journal of Glaciology*. 59 (215). pp 423-437.

**Gaume J., Eckert, N., Chambon G., Naaim M., Bel, L.** - 2013. Mapping extreme snowfalls in the French Alps using Max-Stable processes. *Water Resources Research*. Volume 49, Issue 2, pp 1079-10.

**Hagenmuller P., Chambon G., Lesaffre B., Flin F., Naaim M.** - 2013. Energy-based binary segmentation of snow microtomographic images. *J. Glaciol.*, 59(217), 859-873.

**Hagenmuller P., Chambon G., Flin F., Morin S., Naaim M.** - 2014. Snow as a granular material: assessment of a new grain segmentation algorithm. *Granul. Matter*, 16, 421-432.

**Maggioni M., Freppaz M., Ceaglio E., Godone G., Viglietti D., Zanini E., Barbero M., Barpi F., Borri Brunetto M., Bovet E., Chiaia B., De Biagi V., Frigo B., Pallara O.** - 2013. A new experimental snow avalanche test site at Seehore peak in Aosta Valley (NW Italian Alps) - part I: Conception and logistics, *Cold Regions Science and Technology* 85, 175-182, doi 10.1016/j.coldregions.2012.09.006.

**Naaim-Bouvet, F., Bellot H., Nishimura K., Genthon, C., Palerme C., Guyomarc'h G. and V. Vionnet**, 2014 Detection of snowfall occurrence during blowing snow events using photoelectric sensors, *Cold Reg. Sci. Technol.* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.05.005>

**Nishimura K., Yokoyama C., Ito Y., Nemoto M., Naaim - Bouvet F., Bellot H. and K. Fujita** (2014) - Snow particle speeds in drifting snow, *Journal of Geophysical Research - Atmosphere* Volume 119, Issue 16, pages 9901-9913, 27 August 2014 doi:10.1002/2014JD021686

**Podoloskiy E. A., Barbero M., Barpi F., Chambon G., Borri-Brunetto M., Pallara O., Frigo B., Chiaia B., Naaim M.** - 2014a. Healing of snow surface-to-surface contacts by isothermal sintering. *The Cryosphere*, 8, 1651-1659.

**Podolskiy E. A., Chambon G., Naaim M., Gaume J.** - 2014b. Evaluating snow weak-layer rupture parameters through Finite Element modeling of shaking-platform experiments. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2, 4525-4580.

**Prokop, A., Schon, P., Singer, F., Pulfer, G., Naaim, M., Thibert, E., Soruco, A.**, Merging Terrestrial Laser Scanning Technology with Photogrammetric and Total Station Data for the Determination of Avalanche Modeling Parameters, *Cold Regions Science and Technology* (2014),doi:10.1016/j.coldregions.2014.11.009

**Trouvilliez A., Naaim-Bouvet F., Bellot H., Genthon C., Gallée H.** (2014) - Evaluation of the Flowcapt acoustic sensor

for the Aeolian transport of snow, submitted to Journal of Atmospheric and Oceanic Technology (under review)

**E. Bovet, M. Maggioni, L. Dreier, P. Bartelt, M. Freppaz, B. Chiaia, P. Dellavedova and V. Segor.** (2014) - "Simulating small avalanches: a comparison to field measurements obtained at the Italian avalanche test site Seehore", submitted to Journal of Glaciology

## ACTES DE COLLOQUE

7 colloques, l'EGU2012 (Vienne 22-27 Avril 2012 [www.egu2012.eu](http://www.egu2012.eu)), l'EGU2013 (Vienne 7-12 Avril 2013 [www.egu2013.eu](http://www.egu2013.eu)), l'EGU2014 (Vienne 27 Avril-02 Mai [www.egu2014.eu](http://www.egu2014.eu)) Interpraevent (23-26 Avril 2012, Grenoble), l'ISSW2012 (Anchorage 16-21 septembre 2012 <http://arc.lib.montana.edu/snow-science/search.php?workshop=International+Snow+Science+Workshop+Proceedings+2012>), l'ISSW2013 (Grenoble-Chamonix 7-11 octobre 2013) ([http://www.anena.org/uploads/Anena/ISSW13\\_proceedings.pdf](http://www.anena.org/uploads/Anena/ISSW13_proceedings.pdf)), l'ISSW2014 (29 septembre-3 octobre Banff) (<http://arc.lib.montana.edu/snow-science/search.php?workshop=International+Snow+Science+Workshop+Proceedings+2014>), Davos Atmosphere and Cryosphere Assembly (Davos July 8-12 2013 [http://www.daca-13.org/index\\_EN](http://www.daca-13.org/index_EN)) ont permis la valorisation des résultats.

**Barbero M., F. Barpi, M. Borri Brunetto, E. Bovet, E. Ceaglio, B. Chiaia, V. De Biagi, M. Freppaz, B. Frigo, D. Godone, M. Maggioni, O. Pallara, L. Pitet, V. Segor, D. Viglietti** (2013). Measurements at Seehore test site in winters 2010/2011, 2011/2012 and 2012/2013. Davos Atmosphere and Cryosphere Assembly DACA-13, 8-12 July 2013, Davos (CH).

**Bellot, H., Naaim-Bouvet, F., Faug, T., Naaim, M., Caccamo, P., Ousset, F.** -2012. Suivi du couloirs avalancheux de Taconnaz. Mesures de pression sur les tas freineurs. 12th Congress INTERPRAEVENT 2012 - Grenoble / France.

**Bellot H., Naaim-Bouvet F., Naaim M., Faug T., Caccamo P., Ousset F.** - 2013. Taconnaz avalanche path: pressure and velocity measurements on breaking mounds" Proceedings of the International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France, F. Naaim-Bouvet, Y. Durand and R. Lambert (eds.), ANENA—Irstea—Météo-France, pp. 1378 1383.

**Bellot H., Naaim-Bouvet F., Piard L., Palerme C., Genthon C.** - 2013. Drifting and blowing snow measurements : comparison between snow particle counter and a simple photoelectronic fork sensor (Wenglor)" Proceedings of the International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France, F. Naaim-Bouvet, Y. Durand and R. Lambert (eds.), ANENA—Irstea—Météo-France, pp. 1009 1013.

**Bellot, H., Naaim-Bouvet, F., Faug, T., Naaim, M., Caccamo, P., Ousset, F.** -2012. First measurements of pressure and velocity on breaking mounds in Taconnaz avalanches path : Event of 29th December 2010, EGU General Assembly, Vienna.

**Bellot H., Naaim-Bouvet F., Ito Y., Deschatres M., Amory C.** (2014) - Characterization of sastrugi fields with TLS (Terrestrial Laser Scan) and simple digital photos, European Geosciences Union General Assembly 27 April-2 May 2014, Vienna EGU 2014.

**Bornaz L., N. Durand, B. Frigo, P. Dellavedova, V. Segor** (2013). "A new application for quick boundary limits of avalanche events: procedure and first validation". International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France.

**Bovet E., M. Maggioni, L. Pitet, B. Chiaia, M. Freppaz, V. Segor and P. Dellavedova** (2013). "A simple method to study snow erosion and deposition processes in small avalanches: the straw test". International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France.

**Bovet E., M. Maggioni, P. Bartelt, B. Chiaia, M. Freppaz and V. Segor** (2013). "The chance of RAMMS to simulate the small avalanche triggered at the Seehore test site on 2011.03.05". International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France.

**Bovet E., Chiaia B., Maggioni M., Godone D., Freppaz M.** - 2012. Different Surveys Techniques to Assess the Snow Erosion and Deposition at the Punta Seehore Test Site. ISSW 2012 Proceedings, International Snow Science Workshop, Anchorage (AK, USA), 16-22 October 2012.

**Bovet E., M. Maggioni, L. Dreier, P. Bartelt, B. Chiaia, M. Freppaz** (2013). The chance of RAMMS to simulate the small avalanche triggered at the Seehore test site on 2011.03.05. Davos Atmosphere and Cryosphere Assembly DACA-13, 8-12 July 2013, Davos (CH).

**Burelli G., P. Dellavedova, B. Frigo, V. Segor** (2013). "The snow and weather observation network of the Valle d'Aosta Region (NW Italian Alps)". International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France.

**Caccamo P., Naaim-Bouvet F., Faug T.,** - 2013. Influence of upstream catching dam slope on powder avalanche"

Proceedings of the International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France, F. Naaim-Bouvet, Y. Durand and R. Lambert (eds.), ANENA—Irstea—Météo-France, pp. 788 793

**Durand N., G. Ulivieri, E. Marchetti, B. Frigo, P. Dellavedova, M. Ripepe, V. Segor** (2013). "Real-time detection of natural snow avalanches by Infrasonic Array Network (IAN) on December 2012 in Valtournenche - Aosta Valley (IT)". International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France.

**Eckert, N., Favier, P.** - 2012. Risque et décision en ingénierie paravalanche. Journée thématique de la Société Française de Statistique « Statistique décisionnelle et ingénierie sous incertitudes... dans les pas de Jacques Bernier ». 22 octobre 2012. Institut Henri Poincaré, Paris. **Conférence invitée.**

**Eckert, N., Parent E., Naaim, M. Favier, P.** - 2013. Avalanche risk zoning as a total loss minimisation problem. Davos Atmosphere and Cryosphere Assembly, Switzerland, July 8-12, 2013.

**Eckert, N., Parent, E., Favier, P., Keylock, C. J, Naaim, M., Bertrand, D., Schläppy, R., Jomelli, V., Faug, T.** (2013). Long term avalanche risk assessment. Experimental design applied to the forecast of extreme climatic events at the regional scale - PEPER Workshop. Aussois. 15-19 Decembre 2013

**Faug, T., Chanut, B., Caccamo, P., Naaim, M.** -2012 Physically-sound scaling laws for snow avalanche impact pressure optimal design of snow avalanche passive defence structure using reliability approach to quantify buildings vulnerability, EGU General Assembly, Vienna.

**Favier, P., Bertrand, D., Eckert, N., Naaim, M.** (2014). Analyse fiabiliste d'un mur en béton armé soumis à une avalanche de neige modélisé par éléments finis et modèle masse-ressort. 8èmes journées de fiabilité des matériaux et des structures, Aix en Provence, 9-10 avril 2014

**Favier, P., Bertrand D., Eckert, N., Naaim, M.** -2012 Optimal design of snow avalanche passive defence structure using reliability approach to quantify buildings vulnerability, EGU General Assembly, Vienna.

**Favier, P., Eckert, N.** - 2012. Risque et décision en ingénierie paravalanche. Rencontres Statistiques au sommet de Rochebrune 2012, Megève, France, 1-5 avril 2012.

**Favier, P., Bertrand, D., Eckert, N., Naaim, M.** - 2013. Structural vulnerability assessment using reliability of slabs in avalanche area. European Geosciences Union (EGU), Vienne, Autriche, 7-12 avril 2013.

**Favier, P., Eckert, N., Bertrand, D., Naaim, M.** -2012. Optimal design of snow avalanche passive defence structures using reliability approach to quantify building vulnerability. Journées de fiabilité des matériaux et des structures, session maîtrise des risques naturels, Chambéry, 4-6 juin 2012. 13p.

**Favier, P., Eckert, N., Bertrand, D.** - 2012. Formal snow avalanche risk assessment to buildings and optimal design of defense structures. 12<sup>th</sup> Congress INTERPRAEVENT. 23-26 April 2012, Grenoble, France. Poster. Best student poster award, 2<sup>nd</sup> prize.

**Frigo B., A. Prola, A. Welf, N. Durand, P. Dellavedova, V. Segor** (2013). "Avalanche risk management in Winter 2012/13 in Monterosa Ski resort - Aosta Valley (IT)". International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France

**Gaume, J., Chambon, G., Eckert, N., Naaim, M.** - 2012. Influence of weak layer heterogeneity on slab avalanche release. Application to the evaluation of avalanche release depths. European Geosciences Union (EGU), Vienne, Autriche, 23-27 avril 2012.

**Gaume, J., Chambon, G., Eckert, N., Naaim, M.** - 2012. Relative influence of mechanical and meteorological factors on avalanche release depth distributions. Application to French Alps. European Geosciences Union (EGU), Vienne, Autriche, 23-27 avril 2012.

**Gaume, J., Eckert, N., Chambon, G., Naaim, M.** - 2012. Relative influence of mechanical and meteorological factors on avalanche release depth distributions: An application to French Alps. Groupe de travail « Extrêmes en hydrométéorologie », 18 juin 2012, Grenoble, France.

**Gaume, J., Eckert, N., Bel, L., Chambon, G., Naaim, M.** - 2012. Cartographie des chutes de neiges extrêmes dans les Alpes Françaises en utilisant les processus Max-Stables. Séminaire Extremes Lyon-Grenoble, Grenoble 26 Septembre 2012.

**Gaume, J., Chambon, G., Eckert, N., Naaim, M.** - 2013. Influence of tensile strength and weak layer heterogeneity on slab tensile failure propensity. Davos Atmosphere and Cryosphere Assembly, Switzerland, July 8-12, 2013.

**Gaume, J., Chambon, G., Eckert, N., Naaim, M.** - 2013. Influence of tensile strength and weak layer heterogeneity on slab tensile failure propensity. Davos Atmosphere and Cryosphere Assembly, Switzerland, July 8-12, 2013.

**Gaume, J., Eckert, N., Chambon, G., Naaim, M.** - 2013. Max-stable mapping of extreme snowfalls in the French Alps. Davos Atmosphere and Cryosphere Assembly, Switzerland, July 8-12, 2013.

**Guyomarc'h, G., Bellot, H., Durand, Y., Naaim-Bouvet, F., Prokop, A., Vionnet, V.** - 2012. Measurement campaigns to

investigate blowing snow and snow drift conditions at a high altitude site. 2012 International Snow Science Workshop ISSW 16/09/2012-21/09/2012, Anchorage, USA. Proceedings, 2012 International Snow Science Workshop, Anchorage, Alaska. p. 961-967

**Ito Y., K. Nishimura, F. Naaim-Bouvet F., Bellot H., Ravanat X., Thibert E.** - 2013. Wind and snow particle distribution in powder snow cloud. Proceedings of the International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France, F. Naaim-Bouvet, Y. Durand and R. Lambert (eds.), ANENA—Irstea—Météo-France, pp. 587-590.

**Maggioni M., Freppaz M., Christen M., Bartelt P., E. Zanini E.** - 2012. Back-Calculation of Small-Size Avalanches with the 2d Avalanche Dynamics Model RAMMS: Four Events Artificially Triggered at the Seehore Test Site in Aosta Valley (NW Italy). International Snow Science Workshop 2012 Proceedings, ISSW, Anchorage (AK, USA), 16-22 October 2012.

**Maggioni M., N. Durand, B. Frigo, O. Pallara, M. Freppaz, D. Viglietti, P. Dellavedova, V. Segor, F. Naaim-Bouvet and H. Bellot** (2013). "Preliminary measurements and surveys of snowdrift at the Seehore avalanche test site - Aosta Valley (IT)". International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France.

**Maggioni M., Bovet, E., Dreier, L., Buehler, Y., Godone, D., Bartelt, P., Freppaz M., Chiaia, B., Segor V.** (2013). Influence of summer and winter surface topography on numerical avalanche simulations. International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France.

**Naaim-Bouvet, F., Bellot, H., Nishimura, K., Genthon, C., Palerme, C., Guyomarc'h, G.** - 2012. How to detect snow fall occurrence during blowing snow event?. 2012 International Snow Science Workshop 16/09/2012-21/09/2012, Anchorage, USA. Proceedings, 2012 International Snow Science Workshop, Anchorage, Alaska. p. 976-982

**Naaim-Bouvet F., Vionnet V., Bellot H., Naaim M., Guyomarc'h G.** (2014) - Change in snow particle's shape during blowing snow event : effect on the suspension layer, International Snow Science Workshop, 29 September- 3 October 2014, Banff.

**Naaim M., Naaim-Bouvet F., Nishimura K., Abe O., Ito Y., Nemoto M., Kosugi K.** - 2013. Wind tunnel blowing snow study: steady and unsteady properties of wind velocity, mass fluxes and mass exchanges. Proceedings of the International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France, F. Naaim-Bouvet, Y. Durand and R. Lambert (eds.), ANENA—Irstea—Météo-France, pp. 114-119.

**Nishimura K., Yokoyama C., Ito Y., Nemoto M., Naaim-Bouvet F., Bellot H., Fujita K.** - 2013. E Snow particle speeds in the blowing snow. Proceedings of the International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France, F. Naaim-Bouvet, Y. Durand and R. Lambert (eds.), ANENA—Irstea—Météo-France, pp. 147-153.

**Podolskiy, E.A., Chambon, G., Naaim, M., Gaume, J.** - 2012. Mechanics of weak layer snow under cyclic loading studied by FEM. 2012 International Snow Science Workshop ISSW 16/09/2012-21/09/2012, Anchorage, USA. Proceedings, 2012 International Snow Science Workshop, Anchorage, Alaska. p. 617-621.

**Podolskiy E. A., Chambon G., Naaim M., Gaume J.** - 2013. Extraction of Mohr-Coulomb failure properties of snow weak layers using FEM. EGU General Assembly, Vienne Autriche, avril 2013.

**Podolskiy E. A., Barbero M., Barpi F., Borri-Brunetto M., Pallara O., Chiaia B., Chambon G., Naaim M.,** - 2013a. Testing a new shear loading apparatus for in-situ studies of weak snow layers. Proceedings of the International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France, F. Naaim-Bouvet, Y. Durand and R. Lambert (eds.), ANENA—Irstea—Météo-France, pp. 1049-1051.

**Podolskiy, E. A., Barbero, M., Barpi, F., Borri-Brunetto, M., Pallara, O., Frigo, B., Chiaia, B., Chambon G., and M. Naaim** - 2013b. Healing of snow interfaces: cold laboratory experiments on isothermal snow sintering, 2013 AGU Fall Meeting, 9-13 December 2013, San Francisco, USA, C41B-0605 (poster).

**Prokop, A., Vionnet, V., Naaim-Bouvet, F., Guyomarc'h, G., Bellot, H.** - 2012. Combination of measurements methods to investigate snow drift and blowing snow parameters. EUG General Assembly, Vienna.

**Prokop A, Singer F., Pulfer G., Naaim M., Thibert E.** - 2013a. Determining Avalanche Modelling Input Parameters using Terrestrial Laser Scanning Technology. Proceedings of the International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France, F. Naaim-Bouvet, Y. Durand and R. Lambert (eds.), ANENA—Irstea—Météo-France, pp. 770-778.

**Prokop A, Schon P., Vionnet V., Naaim-Bouvet F., Guyomarc'h G., Durand Y., Bellot H., Singer F., Nishimura K.** - 2013b. A Comparison of Terrain-Based Parameter, Wind-Field Modelling and TLS Snow Depth Data for Snow Drift Modelling. Proceedings of the International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France, F. Naaim-Bouvet, Y. Durand and R. Lambert (eds.), ANENA—Irstea—Météo-France, pp. 108-113.

**Pulfer G., Naaim M., Thibert E., Soruco A.** - 2013. Retrieving avalanche basal friction law from high rate positioning of avalanches. Proceedings of the International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France, F. Naaim-Bouvet, Y. Durand and R. Lambert (eds.), ANENA—Irstea—Météo-France, pp. 1418-1424.

Segor V., L. Pitet, M. Maggioni, B. Frigo, M. Freppaz, B. Chiaia, E. Bovet, E. Ceaglio, P. Dellavedova, A. Welf (2013). "The experimental snow avalanche test site at Seehore Peak in Aosta Valley (IT): MAP3 ALCOTRA project". International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France.

Ulivieri G., Marchetti E., Ripepe M., Durand N., Frigo B., Chiambretti I., Segor V. - 2013. Monitoring snow avalanches in the medium range by a network of infrasonic arrays: first results EGU General Assembly, Vienna.

Thibert E., Faug T., Bellot H., Baroudi D. - 2013. Avalanche impact pressure on a plate-like obstacle. Proceedings of the International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France, F. Naaim-Bouvet, Y. Durand and R. Lambert (eds.), ANENA—Irstea—Météo-France, pp. 663-670.

Thibert E., Bellot H., Ravanat X., Ousset F., Pulfer G., Naaim M., Naaim-Bouvet F., Nishimura K., Ito Y., Baroudi D., Prokop A., Schön P., Soruco A., Vincent C., Limam A., Pesaresi D. - 2013. The full-scale avalanche test site, Lautaret, France. Proceedings of the International Snow Science Workshop 2013, 7-11 October 2013, Grenoble, France, F. Naaim-Bouvet, Y. Durand and R. Lambert (eds.), ANENA—Irstea—Météo-France, pp. 1358-1365.

Trouvilliez A., Naaim-Bouvet F., Bellot H., Genthon C., Gallée H. (2014) - Evaluation of FlowCapt™ acoustic sensors for snowdrift measurements, European Geosciences Union General Assembly 27 April-2 May 2014, Vienna EGU 2014.

**Cette production relativement importante est également due au fait que MAP<sup>3</sup> se situe dans le prolongement de DYNAVAL, et s'effectue en parallèle du projet ANR MOPERA démarré depuis 2010 (<http://www.avalanches.fr/mopera-projet/>) et du PHC Amadeus Combination of measurement methods and modeling approaches to investigate snow drift and blowing snow processes.**

## THESES

Bovet, E., 2012. Mechanics of snow avalanches and interaction with structures. Ph.D. thesis. Politecnico de Turin.

Caccamo, P., 2012. Experimental study of the influence of protection structures on avalanches and impact pressures. Ph.D. thesis. Université de Grenoble.

Favier, P., 2014. Une approche intégrée du risqué d'avalanche : quantification de la vulnérabilité physique et humaine et optimisation des structures de protection. Ph.D. thesis. Université de Grenoble.

## **ACTION 5** : **Coordination des activités**

Le Comité de Pilotage (CP) a été constitué le 07.11.2011

Le groupe de pilotage est constitué par:

RAVA :

Valerio Segor

Luca Pitet

Paola Dellavedova

Bernardino Chiaia

Margherita Maggioni

IRSTEA :

Florence Naaim

Emanuel Thibert

Thierry Faug

Mohamed Naaim

Guillaume Chambon

Le Secrétariat du CP est assuré par la Région Vallée d'Aoste

Le CP assure la coordination technique et administrative du projet.

**Réunions du CP** : six réunions ont eu lieu : le 07.11.2011, 05.11.2012, le 01.07.2013, le 12.10.2013, le 08.07.2014 et le 08-09.10.2014.



*Réunion à Quart du 01.07.2013*

## BILAN FINAL ET PERSPECTIVES FUTURES

La collaboration entre partenaires a été très bonne pendant tout le développement du projet. Au cours du projet, les échanges ont contribué à améliorer la qualité des résultats. Les activités réalisées en commun ont permis d'optimiser les ressources utilisées au cours du projet. Il suffit de penser aux tests réalisés sur les instruments conçus par les partenaires italiens (boîte de cisaillement et carottier) dans des laboratoires et sites pilotes des partenaires français. En outre, une bonne collaboration a été réalisée dans le choix et le développement des capteurs du transport de la neige par le vent.

Les résultats ont permis d'accroître les connaissances concernant le risque avalancheux et de nouvelles méthodologies ont été créées. Toutefois, encore des choses restent à faire afin de pouvoir comprendre encore mieux les processus qui règlent le comportement d'une avalanche. La meilleure compréhension de ces processus permettra de réaliser des méthodologies et des instruments toujours plus performants pour une bonne gestion du territoire. Il faut souligner, à ce propos, l'importance des sites pilotes qui permettent, sur des cas réels, de tester ces méthodologies et instruments et de les améliorer.

Pendant la dernière réunion du projet, en particulier, les partenaires du projet ont discuté sur les thématiques d'intérêt pour le futur.

De suite, la synthèse de la discussion :

V. Segor explique que sa structure est en train de travailler sur les scénarios de risque et sur l'évaluation économique des risques.

En ce qui concerne les scénarios, on est en train de travailler soit sur l'amélioration des modèles (de dynamique, de spatialisation du manteau neigeux...) soit sur le développement de méthodologie de gestion (voir plateforme de gestion activités des Commissions Locales Avalanche).

L'évaluation économique des risques doit tenir en compte de plusieurs facteurs : la vulnérabilité des bâtiments et les dommages directs et indirects. A' ce propos, les analyses conduites par N. Eckert (vues dans la présentation du matin) sont très intéressantes et on peut voir de commencer à travailler sur ça sur des cas réels.

Les scénarios impliquent de toute façon le développement des modèles de dynamique d'avalanche (runout, température du manteau neigeux, érosion et déposition de la neige), l'analyse des aires de déclenchement (spatialisation du manteau neigeux, transport de la neige par le vent).

P. Dellavedova met l'accent sur la définition de résilience : avant de commencer un projet, il faut comprendre bien ce que signifie résilience du territoire.

G. Chambon soutient que dans le futur ce serait bien de pouvoir continuer à analyser les arguments traités en DynAval et MAP<sup>3</sup>.

E. Thibert espère de pouvoir travailler sur les pressions d'impact sur les ouvrages : il y a aussi la problématique des impacts sur les pilons pour la remontée mécanique.

X. Ravanat propose d'analyser les avalanches humides (« bouches de baleines ») et pour faire ça, il faudrait intégrer le site du Col du Lautaret.

H. Bellot propose lui aussi l'intégration des sites pilotes existants pour pouvoir améliorer les connaissances des phénomènes.

N. Eckert souligne l'importance des scénarios ; il faut chercher de prédire les avalanches partant de la prévision.

F. Naaim met l'accent sur le transport de la neige par le vent. Il faut continuer à analyser ça, parce qu'il influence aussi la dynamique d'une avalanche. Il faut commencer à croiser les données des modèles de dynamique des avalanches avec les modèles de transport de la neige par le vent.

## ANNEXES

Dans le cadre du projet, plusieurs documents techniques ont été rédigés. En annexe du rapport on peut trouver :

- document de définition des volumes de départ avec technique laser-scanner et photogrammetrie;
- rapport sur les pressions d'impact incluant l'efficacité des ouvrages;
- rapport technique sur la faisabilité d'utilisation du Ground Penetrating Radar;
- rapport technique sur l'utilisation des capteurs de transport de neige;
- rapport technique sur l'utilisation de la stéréo-photogrammétrie dans les couloirs d'avalanches;
- un rapport technique sur les modèles de dynamique des avalanches ;
- rapport des évènements avalancheux 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 et 2013-2014 sur le site de la P.te Seehore (seulement en format informatique) ;
- vidéo sur les activités menées pendant le projet.