

Ecoute sismique des avalanches de neige : apports des méthodes et outils développés pour les chutes de blocs

Projet PGRN 2009-2010

Participants au projet : P. Lacroix¹, J.R. Grasso¹, A. Helmstetter¹, J.-P. Navarre², J. Roulle², Y. Deliot², G. Giraud², D.Goetz²

¹ *LGIT – OSUG, Université Joseph Fourier, Grenoble 1 & UMR 5559 CNRS*

² *CEN / CNRM – Météo France, URA1357*

Résumé

L'estimation de l'activité avalancheuse est actuellement basée sur des observations visuelles. Ces observations sont la base de catalogues dont la précision en temps et en taille reste qualitative. Par exemple, dans le contexte des avalanches en stations, ces estimations sont effectuées quotidiennement sur la base des observations des pisteurs responsables de la sécurité. Dans le cas des avalanches déclenchées par un séisme, de même que pour les glissements de terrains, les inventaires sont issus d'images aériennes ou satellitaires qui moyennent l'activité sur des périodes de temps allant de quelques jours à quelques mois. Ce type de mesures empêche tant une analyse fine de la dynamique des déclenchement d'avalanches que son interprétation en termes d'évolution des paramètres météorologiques et nivologiques.

Depuis une quinzaine d'années, le Centre d'Etude de la Neige (CEN) enregistre les signaux sismiques générés par les avalanches sur trois sites des Alpes françaises. L'interprétation des mesures des stations sismiques « trois composantes » se heurte au problème de la reconnaissance des signaux d'avalanches parmi tous les signaux sismiques enregistrés, et de leur localisation. Pour améliorer cette reconnaissance, nous avons développé dans le cadre de ce projet : (1) un système d'écoute sismique en nappe, adapté aux avalanches, (2) des outils de localisation des avalanches.

Ces développements méthodologiques ont été obtenus en transférant d'une part un savoir-faire acquis sur les éboulements rocheux à l'aide des données de l'observatoire OMIV, d'autre part en s'appuyant sur les acquis des monitorings passés du CEN. Dans ce contexte, nous avons installé une nappe circulaire de six capteurs dans un rayon de l'ordre de 50 m autour d'un capteur central à trois composantes. Cette nappe est localisée à proximité (700m) d'un des sites de détection sismique des avalanches du CEN, en service depuis plus de 15 ans à Saint-Christophe-en-Oisans, situé à environ 45 km au sud-est de Grenoble.

Les capteurs ont fonctionné en continu durant 40 jours en janvier - février 2010, enregistrant micro-séismes locaux, séismes régionaux, éboulements rocheux et avalanches. 80 signaux, ont été identifiés comme ceux d'avalanches de neige, sur la base de leur contenu spectral et de leur durée. Une méthode de formation de voie (corrélation de trace sismique sans identification spécifique d'un type d'onde) précédemment utilisée sur les chutes de blocs (Lacroix and Helmstetter, 2011), a été testées pour localiser l'ensemble des sources sismiques enregistrées.

Les principaux résultats novateurs liés à ce projet, en plus des développement techniques énoncés précédemment, sont : (1) la capacité à suivre les avalanches durant leur écoulement à l'aide de la méthode de « formation de voie », (2) l'évaluation des vitesses d'écoulement des avalanches et la détermination de leur type, (3) une corrélation quantitative avec les données météo (précipitations, température, vent, etc.) et avec les paramètres du manteau neigeux fournis par des simulations numériques, (4) une corrélation avec les chutes de neige et aussi une corrélation (plus faible mais significative) avec les précipitations, l'humidité ou le vent ; (5) un pic d'activité avalancheuse décalé d'environ 3 heures par rapport aux chutes de neige, (6) des corrélations avec les autres paramètres météorologiques significatives mais probablement indirectes.

1. Introduction

Le risque avalanche a un impact important dans l'ensemble des communautés montagneuses de nos sociétés, tant du point de vue de l'impact des avalanches naturelles sur les infrastructures que du point de vue des pertes humaines liées à ces mêmes avalanches et à celles déclenchées par des activités de loisirs. Le déclenchement des avalanches non liées à l'activité humaine est contrôlé par 3 processus : les conditions météorologiques, l'évolution thermo-mécanique du manteau neigeux, et les séismes.

La stabilité du manteau neigeux dépend de la cohésion entre les grains et couches de neige, cette dernière évoluant avec l'humidité, la température, et la charge associée aux chutes de neige ou au vent. L'estimation de la stabilité du manteau neigeux dans l'espace et le temps est donc complexe. L'absence de catalogues exhaustifs pour la localisation des avalanches en temps et en espace ne permet pas de calibrer les de façon quantitative les modèles d'évolution du manteau neigeux. Les observations d'activité d'avalanche sont incomplètes due à 2 raisons principales : l'absence de visibilité au moment de l'avalanche et la présence ou non de dégâts (Laternster et Schneebeli 2002).

Pour une meilleure observation du taux d'avalanche, l'écoute sismique a été envisagée par plusieurs groupes au Canada, en France, au Japon, en Espagne, en Norvège, en Suisse, et en Islande. Dans les Alpes françaises, Météo-France a développé depuis les années 1990 des balises d'enregistrements sismiques, (capteur 3 composantes) avec transmission de données. 3 sites instrumentés permettent d'obtenir des catalogues locaux en temps direct de l'activité avalancheuse, pour une large gamme de taille d'avalanches et quelques soient la visibilité (Lepretre et al. 1998). En plus d'un comptage objectif, l'écoute sismique permet aussi d'accéder à des caractéristiques mécaniques de l'avalanche telle que sa vitesse, sa densité, ou son énergie (Surinach et al., 2000; Biescas et al., 2003 ; Vilajosana et al., 2007a,b, Huggel et al. 2008). En revanche, la localisation spatiale des sources avalanches par méthodes sismiques et leur suivi lors de la propagation reste un problème méthodologique non encore résolu. L'idée directrice de ce projet a donc été de déployer une nappe de capteurs à proximité de couloirs d'avalanche, pour tester et appliquer des méthodes de corrélation inter-traces (Lacroix et Helmstetter, 2011) aux signaux sismiques des avalanches de neige.

Le site de Saint Christophe en Oisans, où une station CEN-Météo France fonctionne depuis une quinzaine d'hiver avec un capteur 3 composantes, a été équipé avec une nappe de 6 capteurs verticaux et un 3 composantes. Cette nappe a fonctionné durant 50 jours en automne 2009, en l'absence de neige et durant 40 jours durant la période enneigée de Janvier-Février 2010. La période automnale a permis de calibrer et caractériser l'ensemble des émissions sismiques locales hors avalanches de neige.

Ce rapport présente une analyse synthétique

- des mesures, (acquisition de données et classification),
- des techniques et résultats de localisations,
- des caractéristiques du catalogues d'avalanches ainsi constitué (temps origine, orientation, vitesse)
- des facteurs météorologiques déclenchants.

2. Zone d'étude

La nappe d'enregistrements sismiques a été déployé à proximité (700m) d'un des sites de détection sismique des avalanches du CEN, en service depuis plus de 15 ans à Saint-Christophe-en-Oisans, situé à environ 45 km au sud-est de Grenoble dans le massif des Ecrins. Les capteurs sont localisés sur une pente orientée SO, à 1700m d'altitude, au dessus de la route connectant St Christophe au hameau de Pré-Clot (1600m d'altitude) (Figure 1). Trois principaux couloirs d'avalanches sont répertoriés dans cette zone (Combe du Saut, Aiguilla, Combe Blanche). Le risque associé aux avalanches issues de ces 3 couloirs a amené la municipalité à mettre en place un service de déclenchement artificiel par explosifs lâchés d'hélicoptères.

Par ailleurs, un « observateur météo » existe à Pré-Clot, où les observations journalières de température min-max, précipitation solide et liquide sont consignées durant la période hivernale. Une station

Nivose situé à 2950m d'altitude et à 13 km de la zone, enregistre au pas horaire la hauteur du manteau neigeux, la température et la vitesse du vent.

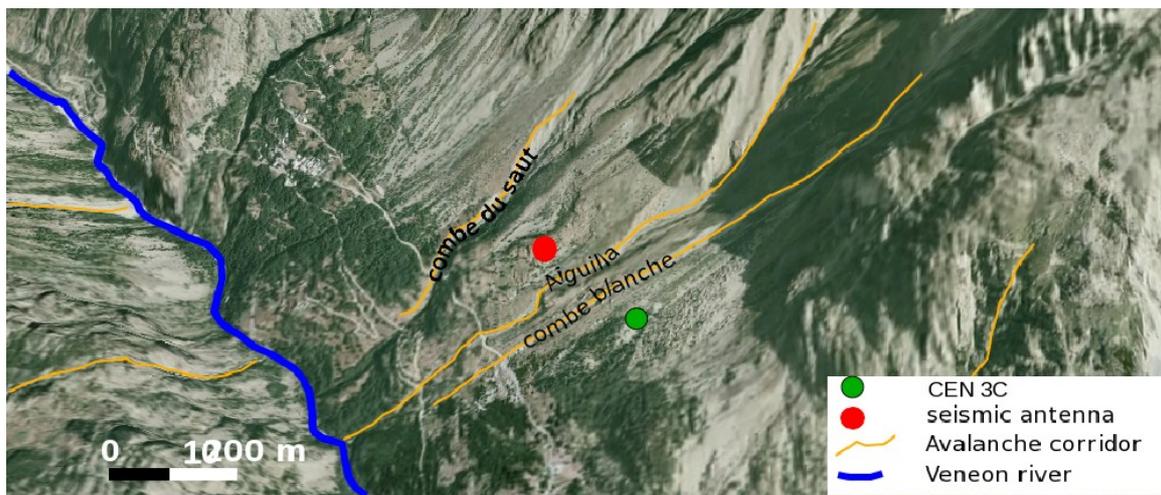


Figure 1: zone d'étude. Le rond rouge situe la nappe sismique, tandis que le rond vert situe la balise sismique de Météo-France.

3. Mesures

3.1 Acquisition de données sismiques

Le réseau sismique a été installé entre les deux couloirs principaux d'avalanche de Combe du Saut et d'Aiguilla, afin de permettre la différenciation d'avalanche d'origines différentes. L'antenne sismique est composée de 6 capteurs verticaux, 4 Hz, disposés en cercle de rayon 50m environ, et d'un capteur 3 composantes, 4Hz, au centre. L'acquisition a fonctionné à l'automne 2009, entre le 2 octobre et le 20 novembre, sans chute de neige, et dans la période enneigée entre le 19 janvier et le 28 février, 2010. Les données entre ces deux périodes ont été perdues en raison d'un problème technique de stockage des données. Le 28 février, une avalanche a causé des dommages à l'installation sismique, ce qui a stoppé la saisie des données. 50 jours d'écoute sismique sont ainsi disponibles en continue, dans des conditions « sans neige » et 40 jours en condition « enneigée » (Figure 2).

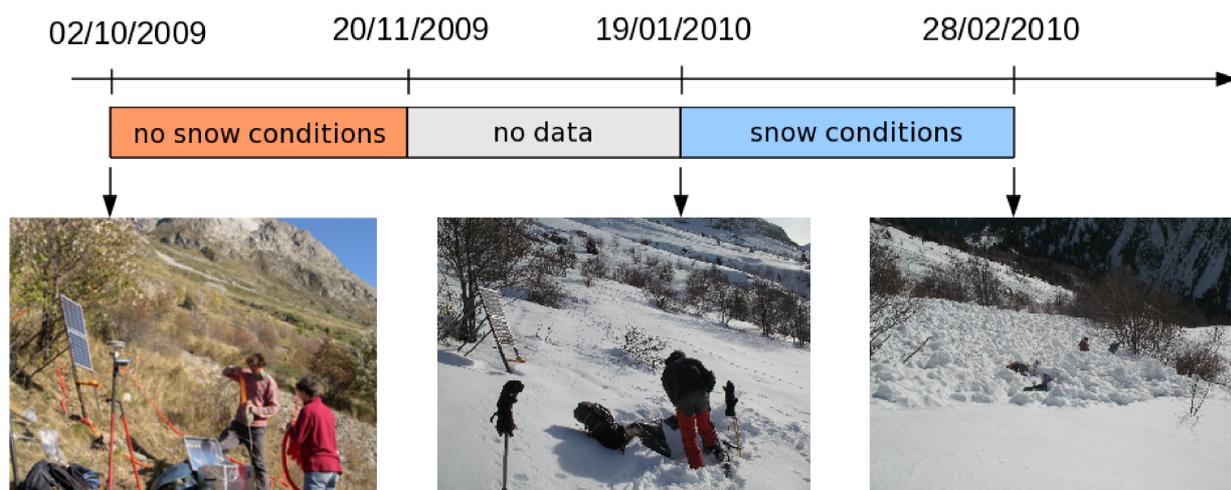


Figure 2: photos de l'expérience.

3.2 Classification des signaux sismiques

Le réseau a enregistré de nombreux types de signaux : l'activité anthropique (les voitures sur la route, hélicoptères, les travaux de génie civil, les tirs, ...), les tremblements de terre locaux, régionaux et éloignés, les éboulements, avalanches de roche, et de neige. La classification des signaux d'avalanche de neige a été effectuée visuellement, en s'appuyant sur le contenu temporel et fréquentiel des signaux, et avec l'expérience acquise sur la période « sans neige » de l'automne. La caractérisation des signaux sismiques d'avalanche a aussi utilisé les rapports des habitants concernant l'observation visuelle de certaines des avalanches, puisque certaines ont coupé la route. Au final 80 signaux ont été classés comme avalanches certaines pour les 40 jours d'enregistrement.

4. Localisation

Une méthode de « formation de voie » a été adaptée de Lacroix et Helmstetter (2011) pour localiser les signaux d'avalanches. Son principe s'appuie sur la mesure d'inter-corrélation de plusieurs signaux. La corrélation fournie par ces méthodes est maximisée pour estimer l'emplacement de la source. La méthode est appliquée aux 80 signaux d'avalanches, sur des échantillons centrés à chaque seconde du signal. Pour chaque avalanche, ceci fournit donc une série de coefficient de corrélation $C(t)$, et emplacement $(X(t), Y(t))$. Pour une meilleure analyse de la série des positions possibles, nous avons enlevé les points de corrélation trop faible relativement aux maxima locaux de $C(t)$. Les résultats de ce processus sont montrés pour 3 avalanches dans la Figures 3.

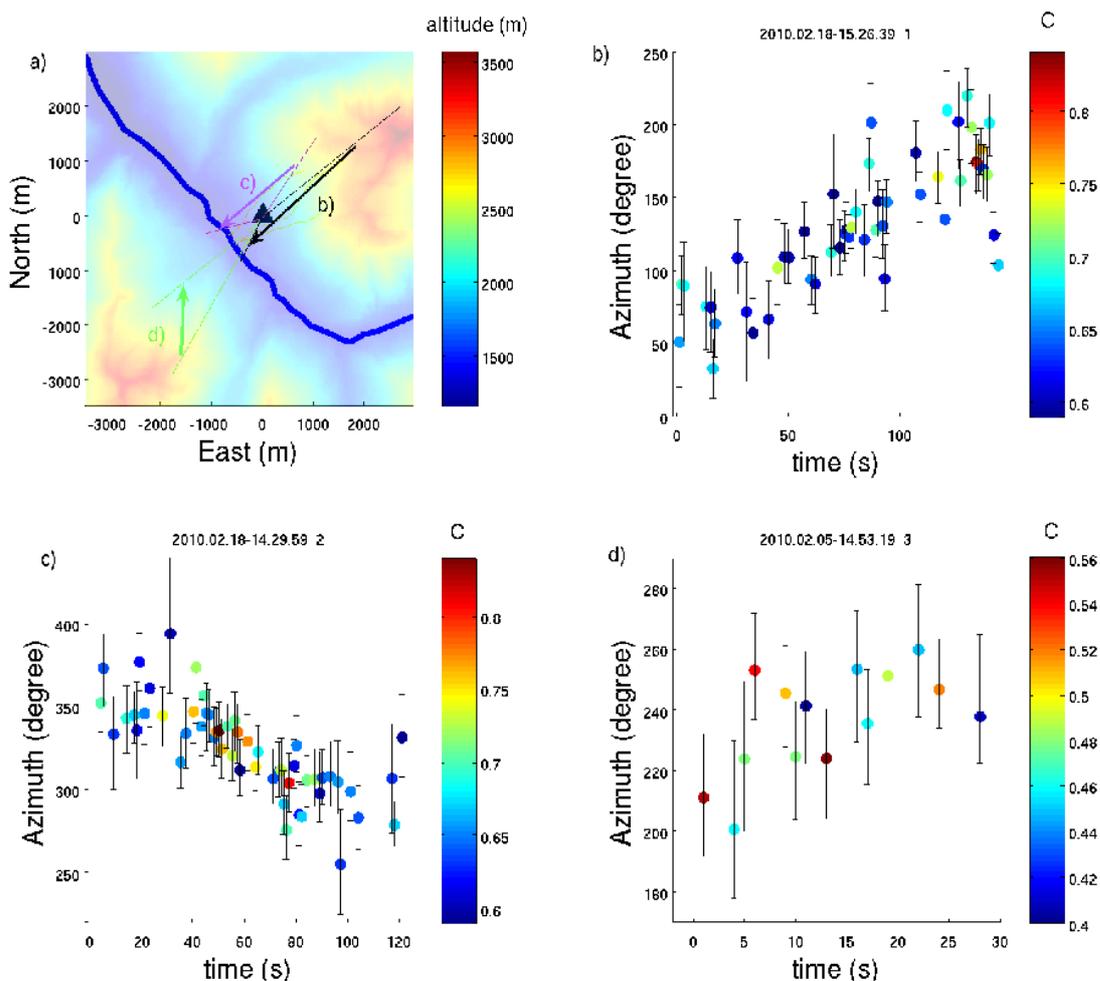


Figure 3: azimuts de 3 avalanches pendant leur propagation repérés sur la carte de la figure a).

La plupart des localisations d'avalanche montrent une bonne précision azimutale. De plus durant la localisation on observe une variation constante d'azimut de la source émettrice de l'avalanche avec le temps, caractérisant la mobilité de la source. La variation d'azimut est observée pour les avalanches de directions différentes. Ces résultats confirment (1) que ces signaux sont des signaux d'avalanche, (2) qu'il est possible de localiser la direction de l'avalanche, (3) qu'il est possible de suivre leur propagation.

5 Résultats

5.1 Répartition des avalanches

Sur la base des azimuts et de leur variation au cours du temps, les avalanches peuvent être divisées en 4 catégories:

- 23 avalanches liées au couloir de l'Aiguilla ou à celui de Combe Blanche :
- 16 avalanches liées au couloir Combe du Saut:
- 28 avalanches provenant des pentes orientées NE au dessus de la rive gauche du Vénéon.
- 13 avalanches plus lointaines dont l'emplacement exact ne peut pas précisément être estimé.

La distribution des heures d'occurrence des avalanches, moyennée sur 40j présente 2 pics de distribution. L'un observé autour de 14h TU ou local correspond aux heures les plus chaudes, et un autre associé aux périodes nocturnes (Figure 4). Ce deuxième pic est principalement relié à l'arrivée d'une perturbation nocturne le 26 janvier 2010.

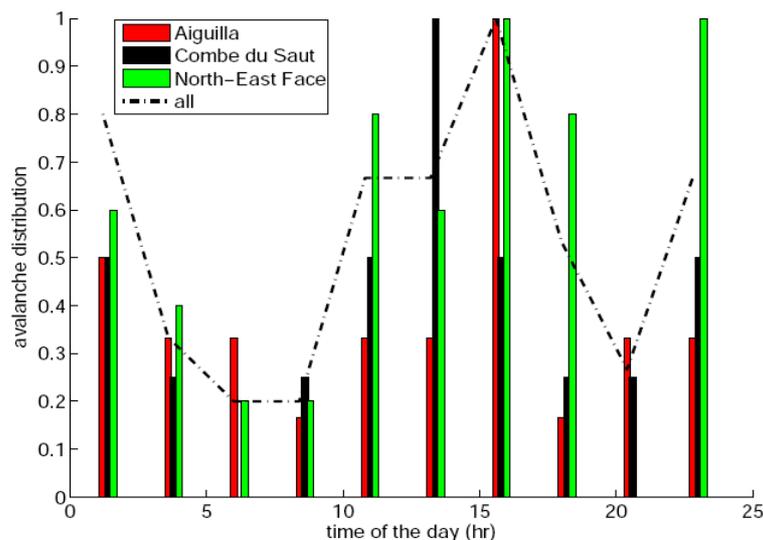


Figure 4: heure de la journée d'occurrence des avalanches

5.2 Vitesse des avalanches

La vitesse des avalanches de la face SO a été estimée grâce à la variation des azimuts observée. L'interception de l'azimut avec la trace du couloir permet de remonter aux positions puis aux distances parcourues dans le couloir. Cette série temps-distance s'organise en segments linéaires sur lesquels les vitesses d'avalanches sont estimées. Ce traitement permet d'estimer 2 types de vitesses: (1) les vitesses du front de l'avalanche en début de signal, qui se propage vers la nappe, (2) la vitesse du corps de l'avalanche qui se propage en aval de la nappe.

Ce processus est effectué pour 22 signaux de la face SO, soit 56 % des signaux de cette face, pour lesquels des variations d'azimut significatives ont été résolues. Les vitesses du corps de l'avalanche sont dans la gamme 3-24 m/s, avec une moyenne de 7.3 ± 6.4 m/s. Les variations par couloir sont très faibles. Les vitesses du front s'étendent entre 12 - 32 m/s (43 et 115 km/h) avec une moyenne de 24 ± 8 m/s (86 ± 28 km/h).

Les valeurs plus basses des vitesses, qui correspondent à la fin de la période d'expérimentation, peuvent être corrélées à un manteau neigeux plus humide.

5.3 Déclenchement des avalanches de neige et forçage météorologique

Une première analyse statistique de cette base de données d'avalanche est proposé en lien avec les paramètres météorologiques enregistrés au station de Pré-Clot (1600m) et à la Nivose des Ecrins (2950m) (Figure 5).

On montre que le taux horaire d'avalanche augmente avec la température et les précipitations. Ce comportement est robuste quelques soient les orientations des faces, NE ou SO. On notera que si peu de précipitation semble pouvoir déclencher des avalanches, nous observons aussi un seuil de précipitation au-dessus duquel le taux d'avalanche augmente. Toutefois, dans la période observée, les forts taux de précipitation correspondent souvent aux plus hautes températures (Figure 5). La distinction ici entre effets de température et précipitation, n'est pas possible. On notera ici l'absence de corrélation avec le vent sur nos données.

Par ailleurs la corrélation du taux d'avalanche avec les données météorologiques horaires permet de voir que le pic d'avalanche est décalé d'environ 3 heures avec les chutes de neige. Ceci montre un effet cumulatif dans le déclenchement des avalanches par les chutes de neige.

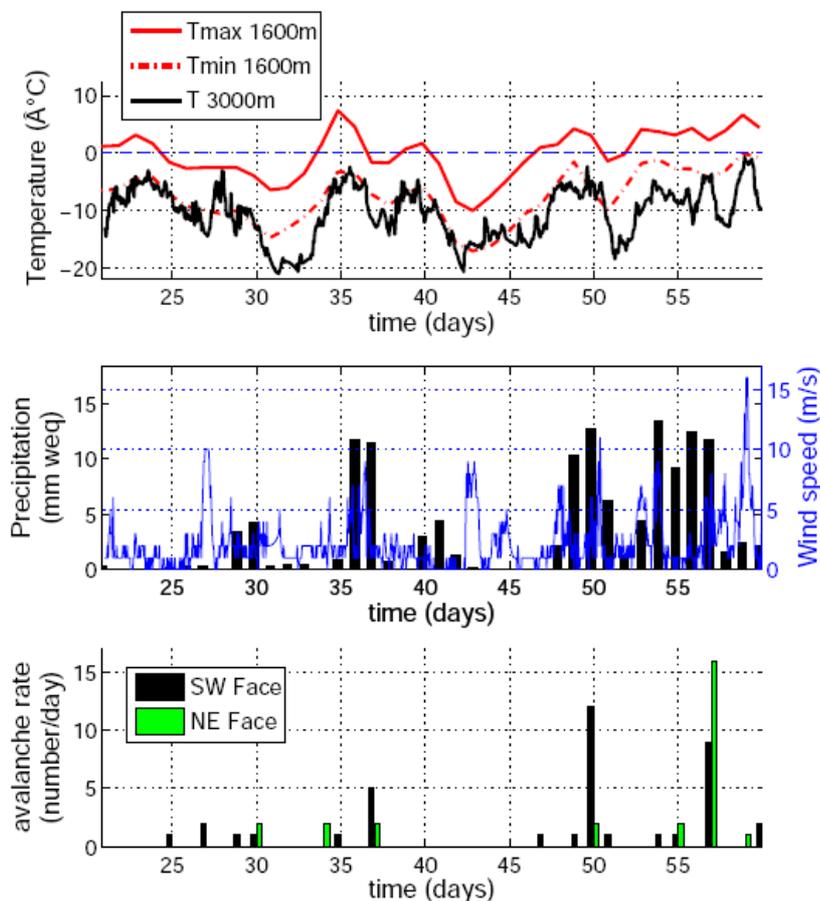


Figure 5: série temporelle de différents paramètres météo (Température en haut, vent et précipitation au milieu) et taux journalier d'avalanche (en bas).

7 Conclusion-perspective

Ces résultats préliminaires montrent que l'utilisation de nappes sismiques pour l'écoute sismique d'avalanches peut permettre non seulement la détection, mais aussi la localisation et le suivi de la propagation d'avalanches. Ceci est d'un très grand intérêt pour les catalogues locaux d'activité d'avalanches. Les

techniques de nappe combinent ainsi les avantages d'une part de l'observation visuelle d'avalanches qui fournit une position précise, et d'autres part les avantages de la détection sismique mono capteur qui fournit un temps précis. La méthodologie proposée amène de nouvelles perspectives pour :

- les nouveaux indicateurs en voie de développement du risque d'avalanche. Par exemple, cette étude suggère une relation entre les températures et l'activité avalancheuse ou encore l'existence de seuil de précipitation pour les forts taux d'avalanche ;
- une compréhension à des échelles temporelles et spatiales plus fine du rôle des paramètres météorologiques sur le déclenchement d'avalanches. Malgré la période courte de notre expérience durant l'hiver 2009-2010 présentée ici, cette étude suggère des caractéristiques intéressantes, comme le temps de réaction de l'activité avalancheuse aux précipitations.

Le site expérimental sera ré-équipée les prochains hivers, pour obtenir des séries temporelles plus longues afin d'améliorer la représentativité des conditions météorologiques. Dans ce contexte, deux perspectives sont planifiées :

- Ce catalogue sera comparé au sortie des simulations de SAFRAN-CROCUS-MEPRA productions (Durand et al., 1999), pour contribuer à améliorer les modèles utilisés pour les prévisions d'avalanche.
- Ce catalogue sera analysé dans sa relation avec les paramètres météorologiques pour élaborer des indicateurs de risque d'avalanche.

8 Bibliographie

- Biescas, B., Dufour, F., Furdada, G., Khazaradze, G., Suriñach, E. (2003), Frequency content evolution of snow avalanche seismic signals. *Surveys in Geophysics* 24, 447–464.
- Durand Y., Giraud, G., Mérindol, L. and E. Martin, (1999), A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecast, *Journal of Glaciology* 45 151, pp. 466–484.
- Huggel C., J. Caplan-Auerbach, R. Wessels (2008), Recent extreme avalanches: triggered by climate change?, *EOS Trans.*, 89 (47), 469-470.
- Lacroix P. and A. Helmstetter (2011), Location of seismic signals associated with micro-earthquakes and rockfalls on the S\echilienne landslide, French Alps, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, In press
- Laternser M. and M. Schneebeli (2002), Temporal Trend and Spatial Distribution of Avalanche Activity during the Last 50 Years in Switzerland, *Natural Hazard*, 27 (3), 201-230.
- Leprettre B., J.-P. Navarre, J.-M. Panel, F. Touvier, A. Taillefer, J. Roulle (1998), Prototype for operational seismic detection of natural avalanches, *Annals of Glaciology*, 26, 313-318.
- Surinach E., F. Sabot, G. Furdada, J.M. Vilaplana (2000), Study of seismic signals on artificially released snow avalanches for monitoring purposes, *Phys. Chem. Earth (B)*, 25 (9), 721-727.
- Vilajosana I., G. Khazaradze, E. Surinach, E. Lied, K. Kristensen (2007a), Snow avalanche speed determination using seismic methods, *Cold Regions Science and Technology*, 49, 2-10.
- Vilajosana I., E. Surinach, G. Khazaradze, P. Gauer (2007b), snow avalanche energy estimation from seismic signal analysis, *Cold Regions Science and Technology*, 50, 72-85.