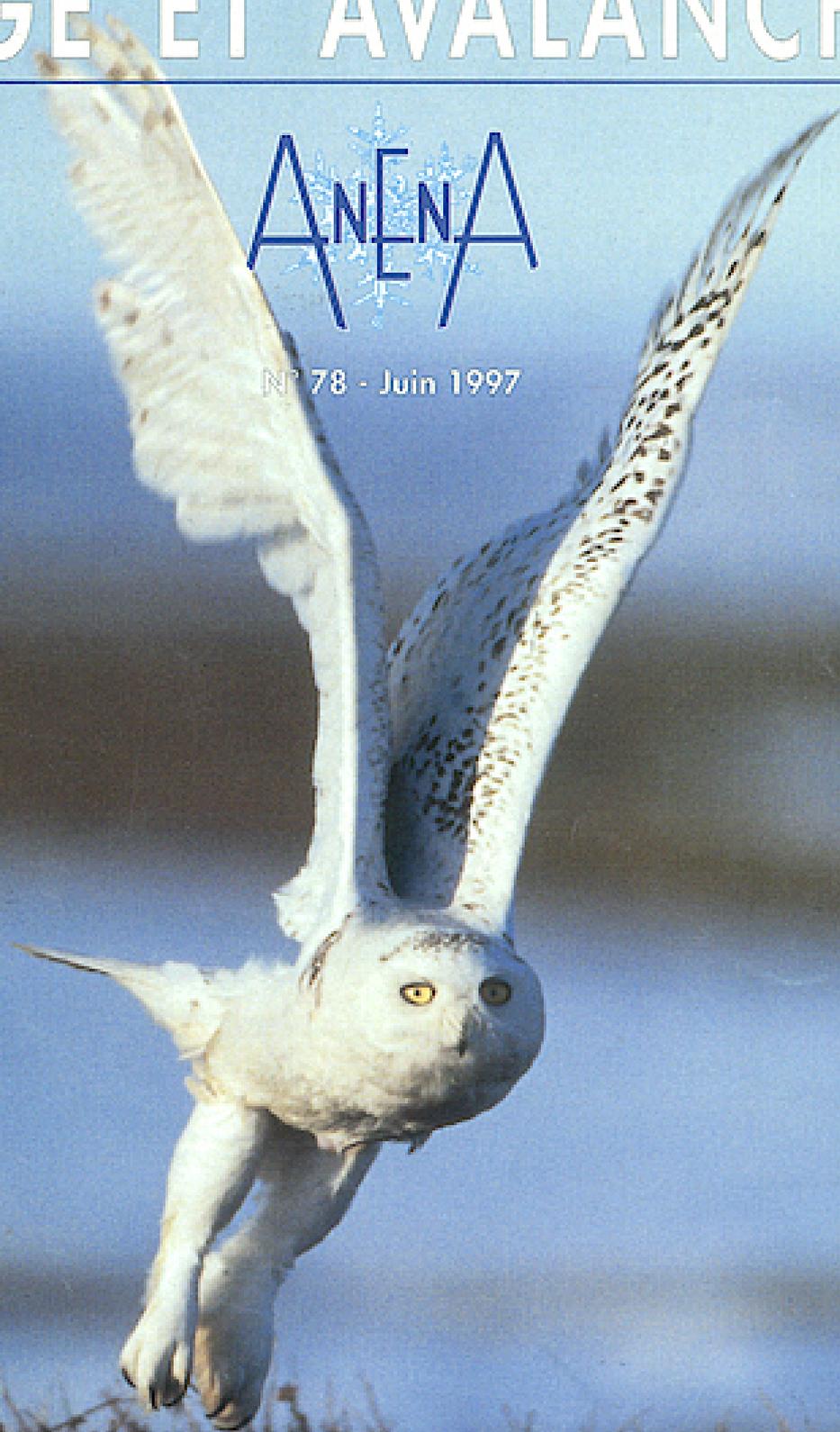


NEIGE ET AVALANCHES



ANENA

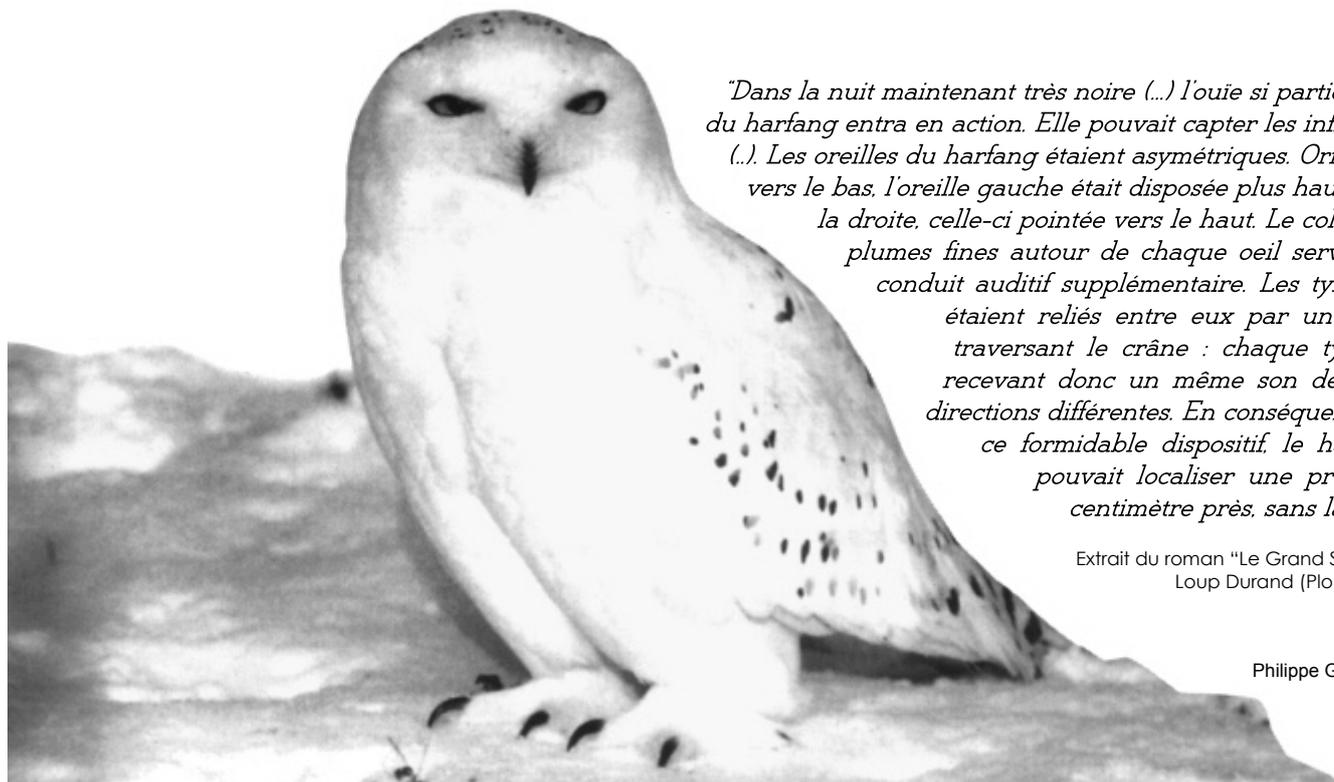
N° 78 - Juin 1997



A L'ECOUTE... DES AVALANCHES

L'ARVA : BILAN ET PERSPECTIVES

ASSOCIATION NATIONALE POUR L'ETUDE DE LA NEIGE ET DES AVALANCHES



"Dans la nuit maintenant très noire (...) l'ouïe si particulière du harfang entra en action. Elle pouvait capter les infrasons (...). Les oreilles du harfang étaient asymétriques. Orientées vers le bas, l'oreille gauche était disposée plus haute que la droite, celle-ci pointée vers le haut. Le collier de plumes fines autour de chaque oeil servait de conduit auditif supplémentaire. Les tympans étaient reliés entre eux par un canal traversant le crâne : chaque tympan recevant donc un même son de deux directions différentes. En conséquence de ce formidable dispositif, le harfang pouvait localiser une proie au centimètre près, sans la voir."

Extrait du roman "Le Grand Silence",
Loup Durand (Plon, 1994).

Photo :
Philippe GARGUIL

A l'écoute ...des avalanches

Pendant leur mouvement, les avalanches produisent des infrasons. Ces infrasons, qui ne sont pas audibles par l'homme - mais peuvent

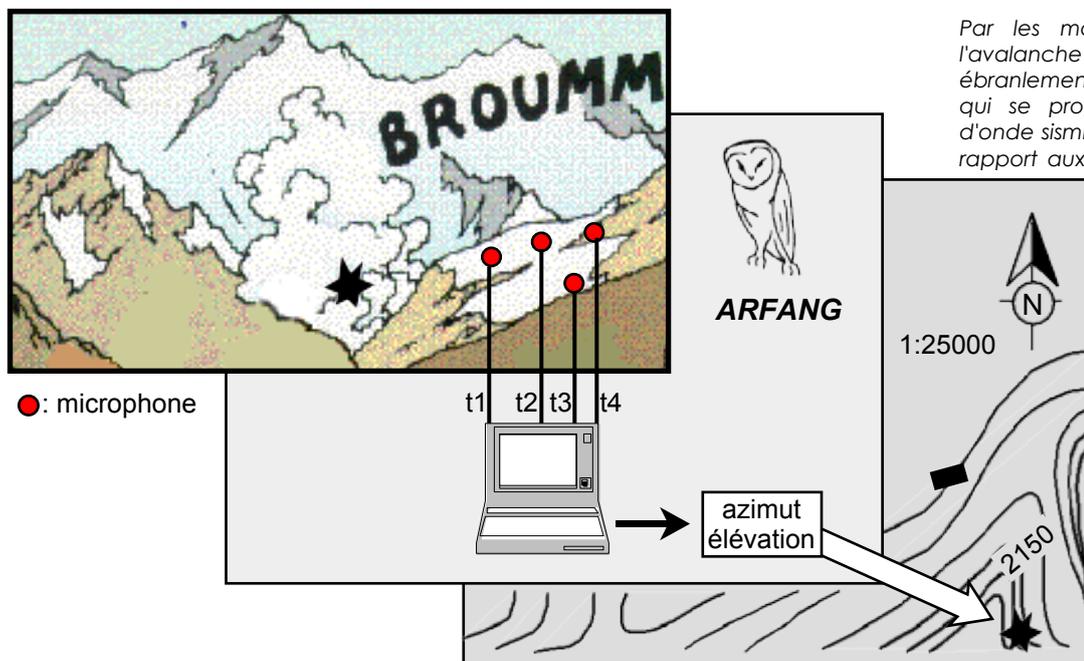


Photo : Vincent Chiffin

être captés par des microphones particuliers - se propagent sur de très grandes distances et contournent les reliefs. Ces propriétés ont conduit à la réalisation d'un dispositif pilote, permettant, à partir d'un emplacement central dans un massif montagneux, la détection et la localisation automatique des avalanches sur un rayon de plusieurs km. Le dispositif, qui comprend 4 microphones placés de manière permanente sous la neige, effectue l'analyse automatique des infrasons captés. Dans le "bruit ambiant infrasonore" de l'environnement, les avalanches sont identifiées à partir de leurs caractéristiques acoustiques, et localisées couloir par couloir en fonction de la direction d'arrivée des ondes acoustiques sur les microphones.

En montagne, en hiver, dans le silence et le souffle du vent qui composent le fond du paysage sonore naturel, se manifeste aussi le bruit des effets de la pesanteur : celui continu des torrents, mais aussi des chutes de pierres, de rochers et séracs qui se détachent ou encore d'avalanches qui dévalent une pente. Or, les observateurs le savent, les avalanches ne font pas toutes du bruit : certaines poudreuses -même les plus grosses- avalent des pentes à grande vitesse dans un silence parfois impressionnant. Au contraire, certaines petites coulées surprennent par leur grondement caractéristique. Tout cela bien sûr dépend de nombreux facteurs : la distance à laquelle se trouve l'observateur, si, dans l'avalanche, des pierres, des blocs de glace ou des troncs d'arbre s'entrechoquent, si l'avalanche saute une barre rocheuse, etc.

Mais cela dépend aussi de notre oreille, qui ne nous permet de percevoir les sons que dans la gamme des fréquences dites "audibles", qui s'étend globalement de 20 Hz¹ (sons les plus graves perceptibles) à 20'000 Hz (limite des ultrasons).



Par les masses mises en mouvement, l'avalanche produit localement un ébranlement de l'air et du sol, ébranlement qui se propage ensuite sous la forme d'onde sismique et d'onde acoustique. Par rapport aux sons audibles, les infrasons se propagent sur des distances beaucoup plus grandes, et sont capables de contourner les reliefs montagneux. Ces propriétés sont à la base du fonctionnement du système ARFANG : en captant les infrasons au moyen d'un groupe de 4 microphones placés dans une région à surveiller, on détermine automatiquement la direction d'arrivée des ondes sonores en fonction de leur délai d'arrivée sur chaque microphone. Ce principe de goniométrie⁵ permet ainsi de localiser le couloir dans lequel se produit l'avalanche.

Et si les avalanches produisaient des sons inaudibles ?

La question s'est alors posée au LEMA² d'étudier si les avalanches produisaient des sons inaudibles, en particulier des "infrasons"³, lesquels présentent par rapport aux sons audibles les propriétés :

- ◆ de se propager sur de très grandes distances, car ils sont très peu atténués par l'air,
- ◆ de contourner des obstacles de grande taille, tels que les reliefs montagneux,
- ◆ de "traverser" sans être trop atténués, des milieux absorbants tel que le manteau neigeux.

Ces propriétés remarquables sont liées principalement à la grande longueur d'onde⁴ des infrasons.

La question de l'émission infrasonore des avalanches s'est posée d'emblée au LEMA dans une perspective de faisabilité concrète : si les avalanches produisent de tels sons, est-il possible de les capter pour détecter et localiser automatiquement - à distance, à partir d'un emplacement bien choisi - les avalanches se produisant à l'échelle d'un secteur ou d'un massif ?

Une première campagne expérimentale, entreprise durant l'hiver 1994/95 par le

LEMA sur le site d'Anzère, en Valais central, a permis de répondre positivement à cette question : 22 avalanches, déclenchées dans un rayon compris entre 0,3 et 5 km ont été détectées et localisées par le système mis en place, avec des niveaux acoustiques mesurés de 40 à 90 dB⁶ dans la gamme de fréquences de 1 à 10 Hz.

Au bénéfice de ces résultats, et dans la perspective d'une réalisation intégrée, l'intérêt pour le développement d'un système pilote de détection et de localisation acoustique automatique des avalanches s'est concrétisé au cours de l'été 1995, avec le soutien de la section "Dangers Naturels du canton du Valais" (projet ARFANG⁸).

Pour la prévision des risques, la connaissance de l'activité avalancheuse des couloirs à l'échelle d'un secteur ou d'un massif est une information d'importance capitale, en particulier pour les systèmes fonctionnant sur les modèles de raisonnement par analogie : en effet, **la prévision, dans une situation nivométéorologique donnée, des événements à venir dans les couloirs d'un site présuppose de connaître le mieux possible l'activité passée de ces mêmes couloirs dans des situations nivométéorologiques voisines.**

Or on sait que cette information, en matière d'avalanches naturelles comme dans certains cas lors de déclenchements artificiels, peut être compromise, voire impossible à obtenir par des observations visuelles uniquement, à cause du manque de visibilité par mauvais temps ou la nuit, des reliefs masquants. etc.

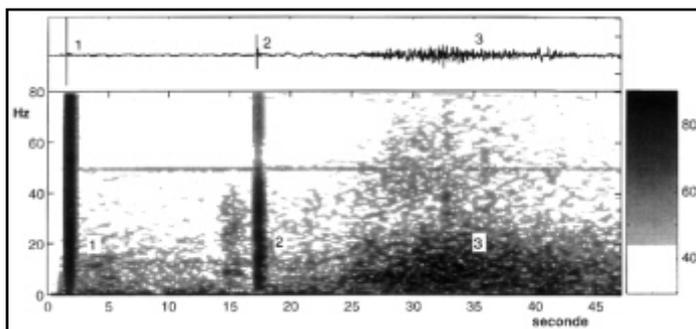


Photo : Vincent Chritin

Microphone utilisé pour les enregistrements d'infrasons pendant la campagne de mesures de l'hiver 1994/95. Les 4 microphones utilisés, de type électrostatique⁷, étaient placés au sommet de mâts dans une bonnette de protection. Les sommets des 4 mâts étaient distants de 50 m les uns des autres, et formaient un plan horizontal en élévation par rapport au sol. A une vitesse du son d'environ 300 m/s, il faut 17 centièmes de seconde à une onde acoustique pour se propager d'un microphone à un autre. Ce dispositif a permis de confirmer l'émission d'infrasons par les avalanches, et de démontrer la possibilité de localiser à distance les couloirs en activité. Toutefois, cette première disposition présentait l'inconvénient de requérir la pose de mâts, et d'être perturbée par les vents forts, qui peuvent induire un bruit infrasonore important.

Cette représentation montre le résultat de l'enregistrement d'une avalanche de neige poudreuse, déclenchée par tir au lance-mine le 31.12.94 sur le site d'Anzère pour la sécurisation du domaine skiable.

La partie inférieure du graphe est une représentation des sons selon deux axes. L'axe horizontal représente le temps, l'axe vertical la fréquence, dans la gamme 1 Hz à 80 Hz. Le niveau de gris de chaque point du graphe traduit le niveau sonore à la fréquence et l'instant correspondants (zones foncées = forte intensité acoustique). On distingue ainsi successivement 1) le départ du coup du lance-mine, 2) l'explosion de la charge au sommet de la pente, après le temps de vol du projectile, 3) l'infrason provenant de l'avalanche.



Dans toutes ces situations, l'intérêt est donc évident de disposer de systèmes de détection automatique des avalanches et par extension de mesure automatique de l'activité avalancheuse dans un massif. **Actuellement, ARFANG est le seul système ayant démontré la faisabilité de la localisation couloir par couloir des avalanches à l'échelle d'un secteur ou d'un massif, et ceci de manière automatique à partir d'un emplacement central.**

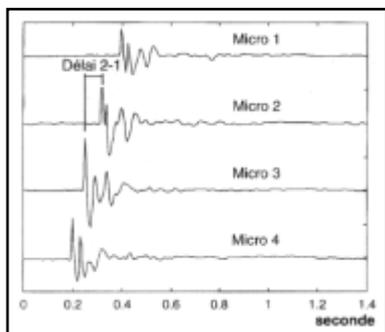
Les avalanches ne sont pas la seule source d'infrasons : dans ce domaine de fréquences, on trouve d'autres sources naturelles telles

que le vent et le tonnerre, et des sources liées à l'activité humaine - transports ferroviaires lourds ou aviation supersonique, industrie, centrales de production d'énergie, oscillations de ponts ou de hauts bâtiments. Dans le "bruit ambiant infrasonore", il est donc nécessaire, en vue de détecter automatiquement les avalanches, d'établir des critères d'identification. Le principe mis en oeuvre par ARFANG est celui de la goniométrie : les infrasons sont captés de manière permanente par 4 micro-phones placés localement dans la région à surveiller, qui transforment les variations de pression acoustique en un signal électrique proportionnel. En comparant les signaux électriques transmis par les 4 microphones, on détermine automatiquement et en continu par corrélation⁹ les décalages de temps d'arrivée des ondes sonores sur chaque microphone. On obtient ainsi de manière immédiate la direction d'arrivée des ondes sonores (azimut par rapport au nord magnétique, élévation par rapport à l'horizon).

Si la direction d'arrivée des infrasons correspond à celle d'un couloir d'avalanche donné - dont l'azimut et l'élévation

géographique auront été prédéterminés - une analyse spectrale¹⁰ de l'infrason est réalisée afin de déterminer si ses caractéristiques correspondent à celles d'une avalanche ou d'une autre source : par exemple, une explosion est un événement court dans le temps, mais sa puissance acoustique se trouve répartie dans toutes les bandes de fréquences. Ainsi, dans un sonogramme¹¹, une explosion se traduit par une raie verticale. Au contraire, le passage d'un hélicoptère, qui produit

un son de fréquence pratiquement constante correspondant aux cycles de rotation des pales, se traduit par des raies horizontales. Par rapport à ces événements acoustiques, l'avalanche



Les 4 traces ci-dessus représentent sous une autre forme les variations de pression acoustique mesurées simultanément par les 4 microphones au moment de l'explosion de déclenchement de l'avalanche. Les microphones étant répartis dans le terrain selon une disposition en demi-croix à trois branches de longueur 50 m - un microphone au centre, les trois autres à chaque extrémité - les décalages "en distance" entre les positions des microphones dans le terrain se retrouvent en décalage "en temps" bien visibles sur les traces ci-dessus : les valeurs des délais permettent de déterminer en temps réel la direction d'arrivée de l'onde.



n'est ni un événement à caractère impulsif (très court dans le temps), ni un événement susceptible de présenter un son pur : elle se matérialise typiquement par une tache oblongue d'une durée de quelques secondes à plusieurs dizaines de secondes, et de spectre infrasonore pouvant s'étendre dans le bas audible.

Le principe de la détection acoustique des avalanches est également applicable à la surveillance d'un couloir unique, avec une configuration considérablement simplifiée. Il ne s'agit alors plus de localiser l'événement mais seulement de détecter la présence des infrasons caractéristiques d'avalanches.

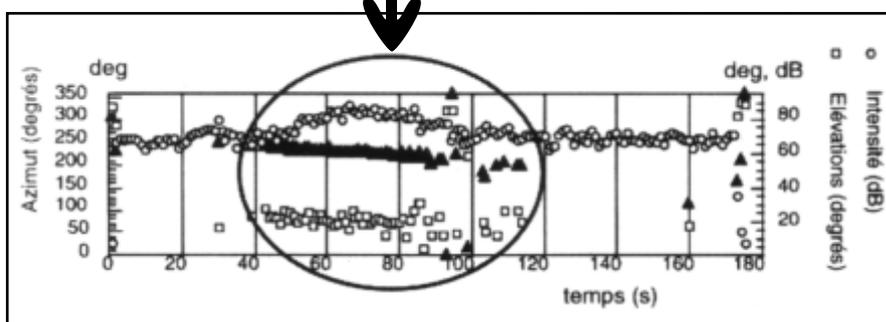
Face aux exigences en matière de qualité de prise de son, de fiabilité technique et de viabilité économique, aucun microphone du marché ne pouvait convenir en vue de la détection opérationnelle d'infrasons en milieu naturel hostile. Fort de son expérience en matière de conception de transducteurs électroacoustiques, le LEMA a alors développé au cours de l'été 1995 un nouveau type de microphone, baptisé ECHO, dédié à ces applications. Quatre exemplaires ont été réalisés et installés sur le site d'Anzère. Dans le but d'éviter à terme l'implantation d'infrastructures de support (type mâts ou socles), et de s'affranchir des effets acoustiques du vent, les quatre microphones ont été disposés dans quatre excavations aménagées directement dans le sol (été 1996).

Les quatre emplacements choisis forment une étoile à trois branches, suivant le relief naturel, et comportant un microphone au centre et les trois autres respectivement situés à chaque extrémité. Chaque branche de l'étoile mesure approximativement 20 m. Durant tout l'hiver, les microphones sont recouverts de neige : les infrasons qui se propagent dans l'air sont donc captés à travers le manteau neigeux.

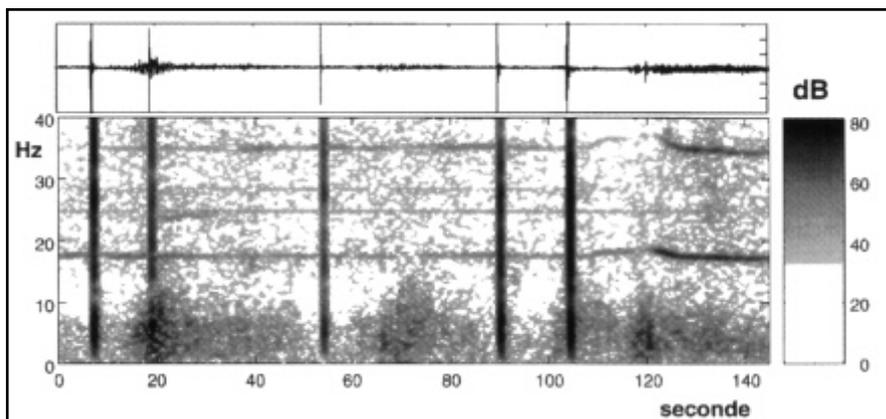
Le système ARFANG est à l'écoute du temps présent : en soi, il ne permet pas de prévoir une avalanche. Le mieux qu'il puisse faire au service de la prévision est d'établir continuellement et automatiquement un rapport d'activité avalancheuse des couloirs d'un site sous surveillance, rapport aussi juste et



Photo : Vincent Chirfin



L'avalanche de Creta-Besse est localisée "acoustiquement" en temps réel. Les microphones sont distants d'environ 3 km du couloir de l'avalanche, celui-ci n'étant pas en vue directe (masqué par un relief). Le graphe montre les valeurs calculées par ARFANG pendant l'avalanche : intensité acoustique, azimut par rapport au Nord magnétique, élévation par rapport au plan de l'horizon. Pendant l'avalanche, l'intensité des infrasons (1-10 Hz) atteint 85 dB, soit une augmentation de 20 dB par rapport au bruit ambiant avant et après l'avalanche. La succession de valeurs d'azimut varie progressivement de 250° à 220°, ce qui correspond au trajet de l'avalanche dans le secteur géographique délimité par les axes de la zone de départ et de la zone d'arrêt de l'avalanche relativement à l'emplacement des microphones. Les valeurs d'élévation oscillent autour d'une moyenne de 20°(valeur absolue).



Ces deux représentations sont celles des sons enregistrés par un microphone placé sous la neige, pendant une série de déclenchements d'avalanches par minage à l'hélicoptère. Sur les deux graphes, on visualise très nettement les raies verticales correspondant à 5 explosions consécutives. Sur le graphe du bas, on différencie les raies horizontales du bruit de l'hélicoptère, et trois taches caractéristiques des infrasons d'avalanches.

Quatre microphones ECHO ont été placés dans des trous dans le sol sur le site d'Anzère au cours de l'été 1996. Durant l'hiver, les microphones sont totalement recouverts et protégés par le manteau neigeux. Les infrasons sont donc captés à travers la neige, ce qui est rendu possible du fait de leur grande longueur d'onde. Avec cette disposition, les microphones ne sont plus perturbés par le frottement aérodynamique du vent sur leurs parois.

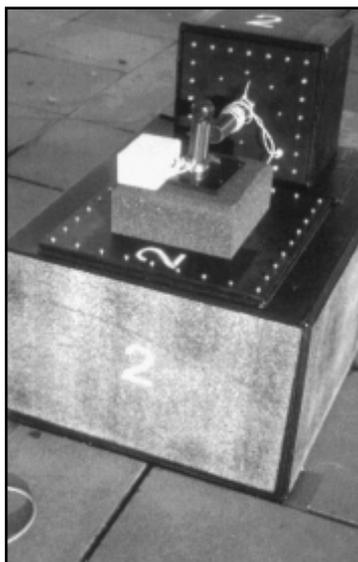


Photo : Vincent Chritin



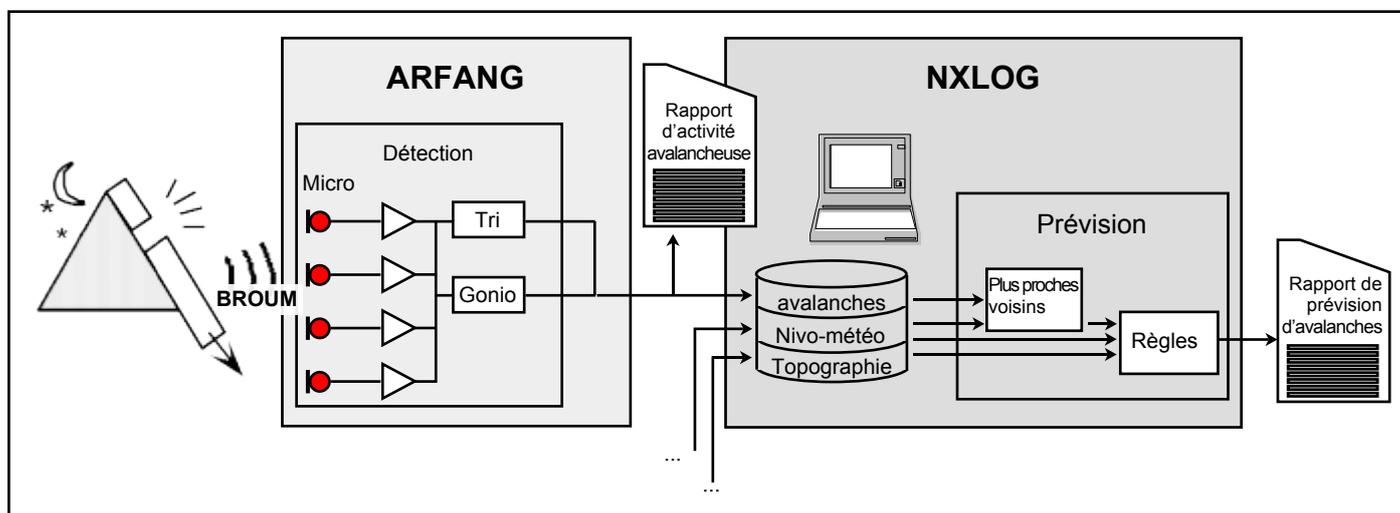
Photo : Vincent Chritin

complet que possible. Cet aspect soulève la question de la qualité de détection des systèmes de mesure automatique de l'activité avalancheuse : puisque ces systèmes présentent justement comme intérêt de faire des observations impossibles manuellement, comment vérifier la justesse de leurs résultats de détection ? Par exemple, dans un échantillon de 60 enregistrements d'avalanches réalisés par le LEMA lors de déclenchements artificiels, dont les résultats de tirs étaient connus sans aucun doute possible, la performance de reconnaissance et de détection automatique par ARFANG est d'environ 90%. Toutefois, cette performance étant mesurée sur un échantillon "choisi", cette valeur n'est pas significative en pratique. D'autre part, lorsqu'un système automatique détecte une avalanche naturelle, rien ne permet d'assurer - dans certains cas - qu'elle s'est bien produite,

ou qu'une autre ne s'est pas produite ... et n'aurait pas été détectée !

Le concept de chaîne de prévision ARFANG-NXLOG prévoit à terme la transmission automatique des rapports d'activité avalancheuse établis par ARFANG à NXLOG, pour archivage dans sa base de données. Le but poursuivi est la mise à disposition automatique - en complément des relevés nivo-météorologiques et topographiques - des données concernant l'activité effective des couloirs du site. Ce concept de chaîne de prévision pour le pronostic de déclenchement accidentel d'avalanches pour chaque couloir d'un secteur est le seul basé sur l'observation automatique de l'activité de ses couloirs.

Si ARFANG permet d'améliorer l'observation de l'activité avalancheuse effective des



couloirs d'un site, notamment en fonctionnant à distance et indépendamment des conditions de visibilité, il est permis d'espérer une amélioration des performances de prévision de NXLOG. Ces deux systèmes pourraient donc constituer une chaîne particulièrement efficace. ■

Vincent CHRITIN
Professeur Mario ROSSI

Remerciements

En complément au soutien du Canton du Valais, avec l'engagement décisif de Charly Wuilloud, le projet ARFANG bénéficie sur le site d'Anzère d'une infrastructure mise à disposition par le Groupement de [Armement (Berne)]. Sans le concours et les nombreux services de la SAREM d'Anzère - et tout particulièrement de J-P. Briguet et d'A. Dussex - le projet ARFANG n'aurait pas vu le jour. De nombreux collaborateurs (-trices) du LEMA ont également transpiré ou grelotté pour le projet ARFANG : V. Adam, M. Alou, R. Dupuis, D. Hejda, A. Robert, J. Maisano, E. Van Lancker.

L'idée et l'intérêt de la détection acoustique des avalanches ont été suscités au printemps 1994 par des discussions enthousiastes avec Thierry Castelle, ... qui nous quittait une année plus tard dans la (Snowy-) Owl River Valley -la Vallée des Harfangs- en Terre de Baffin.

La rédaction de *Neige et Avalanches* remercie MM. JF Hellio, N. Van Ingen (photo de couverture) et M. Ph. Garguil (photo p.2) pour la mise à disposition gratuite de leur photos.

LEXIQUE

1. Hz : nombre d'oscillations par seconde ; ex.: sous l'effet d'un son de fréquence 440 Hz (note La du diapason), le tympan vibre 440 fois par seconde autour de sa position d'équilibre.

2. LEMA : Laboratoire d'Electromagnétisme et d'Acoustique de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne, Suisse, tél. + 41 21 693 26 69, fax + 41 21 693 26 73.

Infrason : son de fréquence inférieure à 16 Hz environ.

3. Longueur d'onde : valeur en mètre, obtenue en divisant la vitesse de propagation d'une onde par sa fréquence : pour un infrason de fréquence 10 Hz, se propageant à la vitesse de 300 m/s, la longueur d'onde est de $300/10 = 30$ m.

4. Goniomètre : instrument de mesure des angles.

5. dB : décibel (référéncés à 20 μ Pa pour la pression acoustique).

6. Microphone électrostatique : la pression acoustique fait vibrer une membrane métallique par rapport à une plaque fixe polarisée.

7. ARFANG : nom du système de détection acoustique des avalanches développé par le LEMA.

8. Corrélation : paramètre décrivant la ressemblance de deux signaux (lorsque deux signaux sont décalés dans le temps, on détermine la valeur du délai les séparant en les recalant progressivement l'un par rapport à l'autre : le délai séparant les deux signaux correspond au décalage pour lequel la ressemblance est maximale).

9. Analyse spectrale : décomposition du son en bandes de fréquences.

10. Sonogramme : mode de représentation des sons selon 3 axes : le temps (en abscisse), la fréquence (en ordonnée), l'amplitude (en axe vertical, ou par exemple en niveaux de couleurs).

BIBLIOGRAPHIE

- Adam V., Chritin V., Rossi M., Van Lancker E., (1997). Infrasonic monitoring of snow avalanche activity: what do we know ? Where do we go from here ? International Symposium on Snow and Avalanches, Chamonix.
- Bolognesi R., (1997). Inferential statistics to verify prediction models. International Symposium on Snow and Avalanches, Chamonix.
- Navarre J.-P., Leprettre B., (1997). Détection sismique des avalanches, Revue ANENA n° 77.
- Adam V., Chritin V., Rossi M., (1996). Acoustic detection system for operational avalanche forecasting. International Snow Science Workshop, Banff, Canada.
- Robert A., (1996). Caractérisation acoustique des avalanches. Mémoire de diplôme, LEMA-EPF-Lausanne.
- Chritin V., Rossi M., (1995). Détection acoustique des avalanches, Site La Sionne - Anzère, Valais, Suisse. Symposium International, ANENA, Chamonix.
- Hejda D., (1995). Caractérisation acoustique des avalanches. Mémoire de diplôme, LEMA-EPF-Lausanne.
- Rossi M., Chritin V., (1995). Microphones pour la détection d'infrasons en montagne. Journée d'étude sur les transducteurs en milieu hostile, Groupe électroacoustique de la Société Française d'Acoustique, Paris.
- Bolognesi R., Buser O., Good W., (1994). Local avalanche forecasting in Switzerland : strategy and tools. International Snow Science Workshop, Snowbird, UT, USA.
- Bolognesi R., Chritin V., Rossi M., (1996). Avalanche control, video 6', LEMA-EPF-Lausanne, I.F.E.N.A. Davos.