

6 Comparaison Image - Sismique - Modèles Numériques.

Comme cela a été dans l'introduction, cette thèse a été effectuée dans le cadre d'un projet européen, lequel groupait 14 laboratoires de 7 pays différents dédiés à l'étude de la neige en général. Certains laboratoires ont comme principal thème de recherche l'étude des avalanches. Dans les études qui sont menées pour l'analyse des avalanches, nous allons faire ressortir les études sur la modélisation numérique des avalanches réalisées par M. Naaim au sein du Cemagref, et les études sur les signaux sismiques réalisés par F. Sabot et E. Suriñach au *Departament de Geodinàmica i Geofísica de la Universitat de Barcelona*. Dans ce chapitre nous nous intéressons à ces deux thèmes car nous voulons présenter les résultats de la comparaison de ces deux méthodes avec les résultats du traitement d'images.

Dans ce chapitre nous ferons une comparaison entre les enveloppes d'une avalanche de neige obtenues à partir des images vidéo, les signaux sismiques provoqués par l'écoulement, et les résultats de l'application des modèles numériques afin d'améliorer la caractérisation du phénomène des avalanches. Nous montrerons l'utilité des images et le traitement d'images dans les domaines de la sismique et de la simulation numérique. Nous analyserons les images vidéo et les signaux sismiques qui correspondent à une avalanche déclenchée artificiellement.

Les images d'avalanches déclenchées artificiellement et les données sismiques furent enregistrées simultanément. Cela nous permet de contrôler une partie de l'information : durée de l'avalanche, profil de la vitesse moyenne et évolution temporelle de l'avalanche, laquelle est impossible d'obtenir quand les avalanches enregistrées ont été déclenchées de façon naturelle.

Localisation et Mesures

Le site expérimental est situé à la station de ski de Boí Taüll dans les Pyrénées catalans. Dans cette station de ski, comme dans beaucoup d'autres, les avalanches sont déclenchées artificiellement afin de protéger les domaines skiables. L'avalanche que nous allons étudier (Raspes Roies) fut déclenchée à l'explosif pendant la saison 1995-96. La sortie de l'avalanche était à 2725 m, et le parcours fut de 840 m en suivant une pente régulière et ouverte, avec un profil convexe orienté vers l'ouest. Le dénivelé total était de 500 m (figure 6-1). La densité de la neige était supérieure à 200 kg/m³. L'écoulement avalancheux était au début de neige dense, développant ensuite un aérosol qui s'est déposé un peu plus loin que la partie dense. Le dépôt présentait des boules et une certaine rugosité.

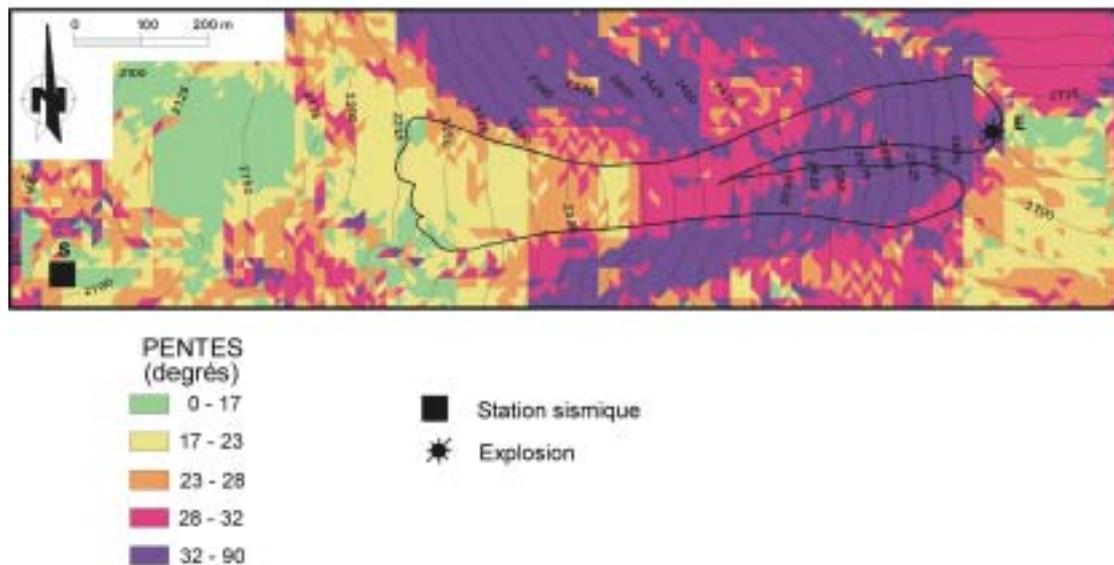


Figure 6-1. Topographie de l'avalanche de Raspes Roies. Zone 1, zone de formation de l'aérosol. Zone 2, phénomène associé à l'arrêt de l'avalanche. E point d'explosion (G. Furdada, Com. Pers.).

6.1 Traitement d'images.

Voyons ce que nous pouvons extraire après application des méthodes de traitement d'images sur l'avalanche de Raspes Roies. Nous présentons un résumé synthétique de l'algorithme d'extraction de contours et du suivi des contours traités de manière plus étendue dans les points **5.2 Détection des contours actifs ou *snakes* : méthode discrète** et **5.3 Suivi temporel des contours de l'enveloppe d'une avalanche**. Nous présentons ce résumé afin de fixer quelques idées.

Algorithme d'extraction des contours

Rappelons que cet algorithme utilise le fait que la frontière entre l'avalanche et le reste de l'image est la partie la plus énergétique de l'image. Le calcul de l'énergie de l'image et la détermination du maximum de ses variations nous permettant d'ajuster un contour initial au contour réel.

L'algorithme peut se résumer de la façon suivante : un premier contour est choisi très proche du contour réel et ensuite nous appliquons l'algorithme qui consiste en :

1. Calcul de l'énergie.
2. Traitement de chaque point du contour en fonction de l'accroissement de l'énergie.
3. Incorporation ou suppression de points en fonction de leur distance.
4. Suppression des points doubles.

Algorithme de suivi de contours

L'algorithme de suivi de contours est directement lié à l'algorithme d'extraction de contours. Pour chaque image, l'algorithme utilise un contour dilaté du contour obtenu par l'image antérieure afin d'initialiser l'algorithme d'extraction de contours.

Application sur l'avalanche de Raspes Roies

L'algorithme de suivi des contours a été appliqué à une séquence de 125 images vidéo de l'avalanche de Raspes Roies déclenchée le 12 Janvier 1996. La variation de l'enveloppe de l'avalanche a été suivie au cours du temps. Sur les images 6-1, 6-2 et 6-3 sont représentés trois instants différents de la séquence. Sur les trois images les lignes blanches indiquent les contours obtenus. L'image 6-1 est placée au début de la séquence, près du contour initial. Nous voyons que l'avalanche est définie d'une manière parfaite. L'image 6-2, image numéro 125 de la séquence, correspond à l'amplitude maximale de l'avalanche. Nous considérons que ce contour a encore une bonne précision, bien que nous puissions vérifier que la ligne blanche, le contour, ne suit pas exactement la partie droite de l'avalanche, à gauche dans l'image. Finalement l'image 6-3 nous montre différents contours entre la première et la dernière image de la séquence. Les résultats obtenus nous indiquent que l'algorithme développé est bien adapté à nos images. Nous obtenons des résultats assez corrects qui peuvent être utilisés comme un outil de validation pour les modèles numériques des avalanches de neige. De toute façon, pour améliorer la méthodologie, c'est nécessaire de reconstruire en 3D la séquence de contours. Cela implique qu'il faut identifier sur l'image et sur la structure du modèle numérique du terrain un nombre de points suffisants.



Image 6-1. Image du début de la séquence. Image 1. Contour initial.

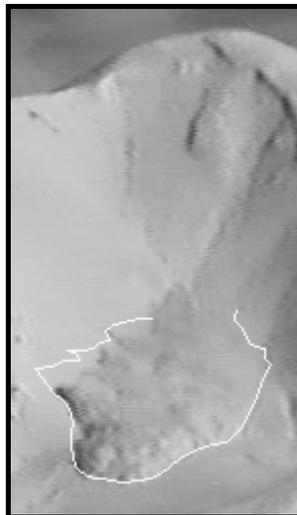


Image 6-2. Dernière image de la séquence. Image 125. Contour final.

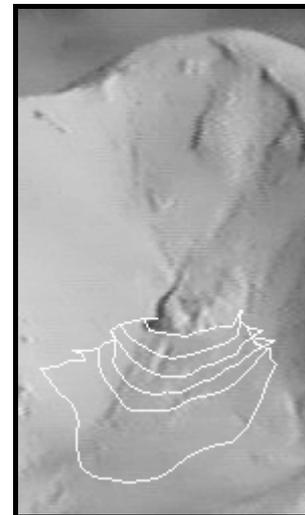


Image 6-3. Différents contours entre le premier et le dernier. Nous pouvons apprécier l'évolution du front de l'avalanche.

Les contours calculés par l'algorithme de suivi résultent en fait d'une projection de l'enveloppe de l'avalanche sur le plan image de la caméra. Un prétraitement est donc nécessaire pour corriger l'effet projectif et éventuellement obtenir l'échelle réelle du contour.

6.2 Etude des signaux sismiques.

Par la suite nous ferons une brève description de différentes études réalisées sur les signaux sismiques d'avalanches.

St Lawrence et Williams (St. Lawrence et Williams, 1976) furent les premiers qui utilisèrent méthodes sismiques pour l'étude des avalanches de neige. Ils ont montré que les avalanches provoquent un signal sismique caractéristique lequel peut se distinguer des signaux produits par d'autres sources.

Les premiers travaux réalisés au sein du C.E.N. (Centre d'Etudes de la Neige) ont permis différencier quelques caractéristiques des enveloppes de quelques signaux d'avalanches et des tremblements de terre (Bonnet, 1980). Au début, ils ont travaillé avec des signaux analogiques, ultérieurement, et en travaillant avec signaux numériques ils ont développé une méthode de discrimination automatique des signaux d'avalanches (Leprettre, 1996). Son travail lui a permis la mise au point d'un dispositif de reconnaissance automatique des signaux d'avalanches. Malgré cela, ils n'ont pas encore arrivé à une parfaite discrimination puisqu'il leur manque l'approfondissement dans la connaissance des caractéristiques propres des signaux des avalanches.

D'autres études, qui utilisent les signaux sismiques, ont été faites au Japon, au site du Shiai-dani, et en Norvège, au site du Ryggfonn. Ces études ont été menées par Nishimura (Nishimura et al., 1993a, 1993b et 1997) à partir des données provenant des capteurs installés sur une structure dans la zone d'arrivée de l'avalanche. Avec des données comme les pressions d'impact, la vitesse du vent et les registres des mouvements du sol, Nishimura et al. (1993 a et b), calculent la vitesse moyenne de l'avalanche en utilisant la différence du temps entre le signal dû à l'explosion et l'impact sur un mur de contention placé dans la zone d'arrivée de l'avalanche.

Dans les Pyrénées catalanes fut installé, par le S.G.C. (Servei Geològic de Catalunya) en collaboration avec le *Departament de Geodinàmica i Geofísica* (Université de Barcelone) une station sismique automatique dédiée à l'enregistrement des signaux sismiques d'avalanches en 1988. Les analyses des signaux menés au S.G.C. avaient pour objectif de montrer les différences entre les signaux sismiques des avalanches et des tremblements de terre (Olivera et al., 1995). L'impossibilité d'identifier avec sûreté les signaux qu'on disposait provenant d'avalanches difficulté l'obtention de cet objectif. La grande diversité de formes des signaux obligea à projeter une étude beaucoup plus systématique. C'est dans ce stade que le groupe des avalanches du *Departament de Geodinàmica i Geofísica* s'est ajouté à l'étude plus intensément dans des projets nationaux, et en participant dans des projets européens, d'abord avec le Capital Humain et Mobilité, et plus tard avec le SAME.

L'importance des études sismiques des avalanches est justifiée parce qu'à partir de celles-ci nous pourrions les caractériser. La finalité de ces études est le contrôle de l'activité des avalanches en zones isolées, où en situations météorologiques telles que l'observation des avalanches est impossible. Pour l'approfondissement des connaissances des signaux sismiques, les données sismiques et les images d'avalanches déclenchées artificiellement furent enregistrées simultanément. Cela nous permet de contrôler une partie de l'information (durée de l'avalanche, profil de la vitesse moyenne, évolution temporelle de l'avalanche) qui est impossible d'obtenir lorsque les avalanches enregistrées ont été déclenchées d'une manière naturelle. Dans ce paragraphe nous utiliserons les données provenant des enregistrements vidéo pour essayer d'interpréter des signaux sismiques.

Application sur l'avalanche de Raspes Roies

La station sismique utilisée pour enregistrer le signal sismique de l'avalanche de Raspes Roies était située en face du couloir à 1500 m de distance du point de l'explosion. L'enregistrement sismique fut réalisé à l'aide d'un équipement sismique standard. L'ensemble a une réponse plane entre 2 et 40 Hz par un géophone à trois composantes. Les signaux furent obtenus avec une fréquence de 100 échantillons par seconde.

Dans les enregistrements sismiques obtenus pendant l'expérimentation il y a le signal dû à l'explosion et le signal dû à l'avalanche. Le signal de l'explosion, à son tour, est composé de trois parties différentes qui sont facilement identifiables. Ces trois parties différentes correspondent aux ondes qui se propagent par le sol, dues à l'explosion, les ondes sonores et les ondes dues à l'écho. La situation du point d'explosion, bien connu, peut être confirmée en déterminant son azimut à partir de l'étude du mouvement de la particule dans le plan horizontal du premier train d'ondes. Les vitesses de propagation des ondes sismiques dans le sol peuvent être estimées en utilisant la distance entre la station sismique et le point d'explosion, et la différence entre le temps d'arrivée des trains d'ondes correspondants à l'explosion qui voyagent par l'air et par le sol (Suriñach et Sabot, 1999).

Par la suite (figure 6-2) nous présentons l'enregistrement sismique obtenu pendant l'avalanche de Raspes Roies à la station de ski de Boí Taüll.

Les signaux sismiques furent convertis en mouvements du sol en utilisant la fonction de transfert utilisée par Sabot et al. (1998).

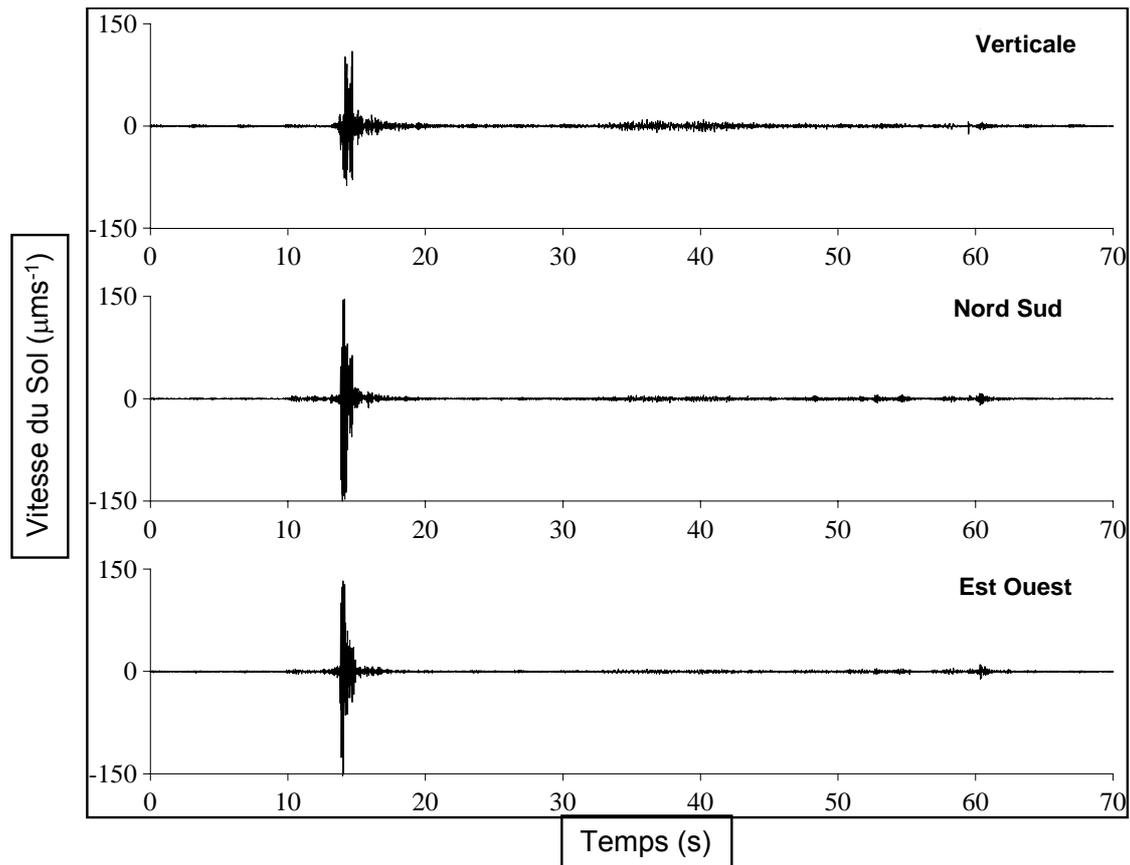


Figure 6-2. Signal sismique des trois composantes de l'avalanche de Raspes Roies. Extrait de Sabot et al, 1998.

L'étude sismique qui se réalise au *Departament de Geodinàmica i Geofísica de la Universitat de Barcelona* consiste en (Suriñach et al, 1999) :

- La détermination du mouvement du sol, conversion mV à m/s, le contrôle du bruit sismique du site expérimental avant, pendant et après l'expérimentation, dans les domaines de fréquences et de temps.
- La détermination des caractéristiques sismiques du site (estimation de la vitesse de propagation et les possibles effets locaux).
- Identification des différents trains d'ondes de l'avalanche en relation avec les images vidéo (domaine temporel).
- L'analyse fréquentielle des différentes parties du signal de l'avalanche.
- L'étude du mouvement des particules pour chaque train d'ondes.

Nous laisserons l'approfondissement de cette étude aux sismologues. Nous allons faire la comparaison entre les images vidéo et la sismique.

À partir des données fournies par le signal de l'explosion et la distance entre la station sismique et l'explosion pendant l'avalanche de Raspes Roies (Sabot et al, 1998) la vitesse des ondes qui se propagent par le sol est de 2903 m/s.

Comparaison image vidéo - signal sismique

Le premier travail réalisé fut la synchronisation du temps 0 du signal sismique avec la visualisation du début de l'explosion sur les images vidéo. Rappelons que pour le signal sismique nous travaillons à 100 échantillons par seconde tandis que pour les images vidéo nous travaillons à 25 échantillons par seconde. Malgré cette différence nous pensons que cet ordre est suffisant pour pouvoir considérer le travail comme correct pour une première approche.

La comparaison des images vidéo et du signal sismique correspondant permet de déterminer l'origine de chaque train d'ondes. Pour cela il est nécessaire de décaler dans le temps le signal sismique en tenant en compte la vitesse des ondes qui se propagent par le sol.

Les ondes sismiques générées par l'avalanche de Raspes Roies sont montrées par la figure 6-3. Pendant les 20 premières secondes après l'explosion on observe aucune croissance de l'amplitude des ondes qui soit suffisante pour être attribuée à l'avalanche. Le train d'ondes d'une durée de 12 secondes correspond aux images où l'avalanche commence à développer un aérosol en arrivant au changement de pente de la topographie (1 sur la figure 6-3). Ce changement de pente est visible dans la carte des pentes de la zone (figure 6-1). Dans cette partie, l'avalanche arrive à sa vitesse maximale et un aérosol commence à se former, comme nous verrons plus tard dans le paragraphe dédié à la simulation numérique. Les trains d'ondes de la dernière partie du signal correspondent aux images de la phase d'arrêt de l'avalanche (2 sur la figure 6-3).

L'utilisation du traitement d'images n'est qu'une aide à l'interprétation du signal, mais c'est déjà bien car c'était une première dans l'étude des avalanches.

Les résultats de cette comparaison suggèrent que les particularités des signaux sismiques enregistrés correspondent à des modifications dans le type de flux de l'avalanche et des modifications de la pente pendant le parcours, à des interactions avec des obstacles et aux processus associés à la phase d'arrêt de l'avalanche.

L'importance des études sismiques des avalanches est justifiée parce qu'à partir de celles-ci nous pourrions les caractériser ayant comme finalité le contrôle de l'activité des avalanches dans des zones isolées où dans des situations météorologiques où l'observation de celles-ci est impossible.

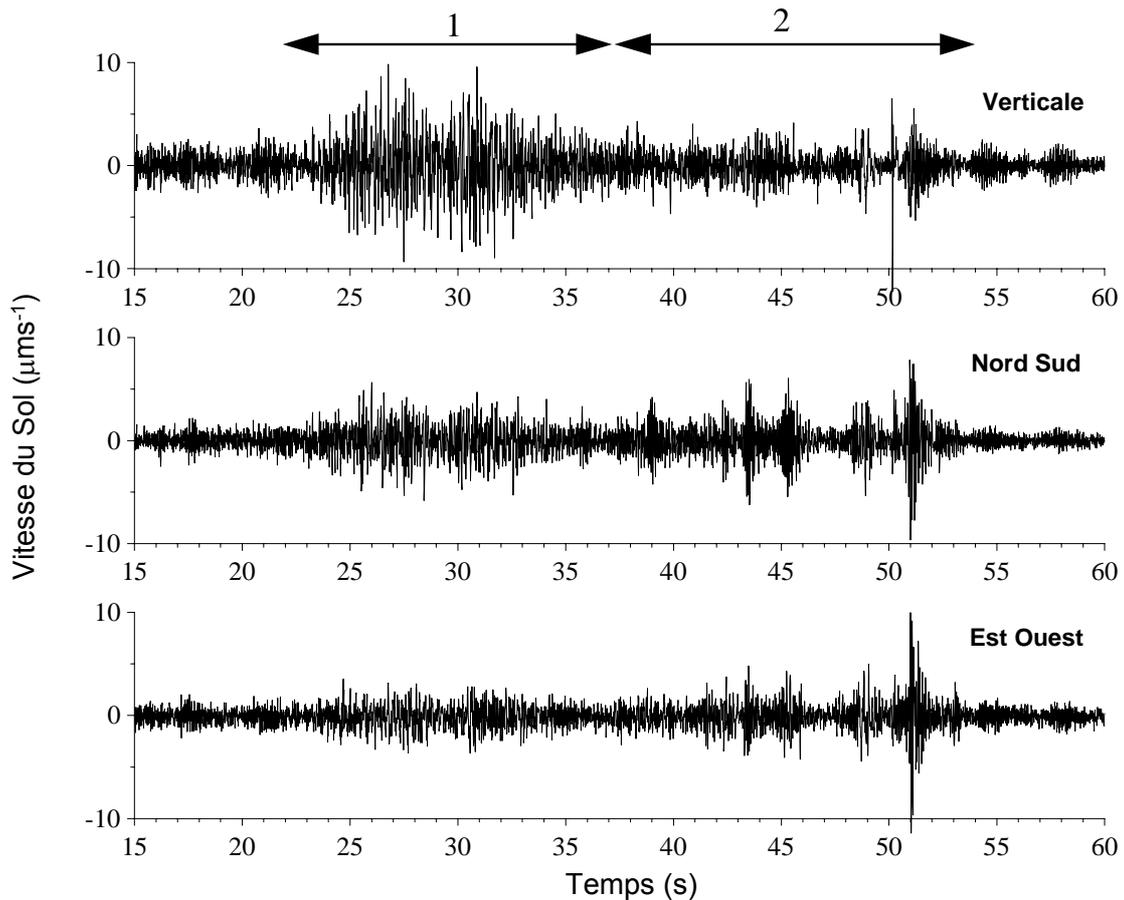


Figure 6-3. Signal sismique des trois composantes de l'avalanche de Raspes Roies. Nous avons représenté les différents parties identifiées par comparaison avec les images vidéo. 1 : formation d'un aérosol dû au changement de pente. 2 : phénomène associé à l'arrêt de l'avalanche. (Sabot et al, 1998).

6.3 Modélisation Numérique.

Certains modèles numériques mis au point au Cemagref par M. Naaim prévoient la trajectoire de l'avalanche à partir des données topographiques et nivologiques. On peut donc comparer les contours obtenus par la simulation et les contours obtenus par traitement d'images.

La comparaison pose le problème évident du critère de comparaison, car il est évident que le modèle ne peut prédire exactement la réalité.

On peut remarquer que les avalanches étudiées se déplacent sur un plan sensiblement régulier. Pour les avalanches réelles aucun relief n'est en général visible, sauf les couloirs de départ.

Naaïm et Ancey (1995) considèrent qu'une avalanche est un flux granulaire dense qui peut être simulée en utilisant un modèle 2D basé d'après les équations des eaux superficielles, en adoptant la formulation suivante pour le terme de friction :

$$\tau = \tau_0 + \rho_d g h \cos \theta \tan \varphi + a \|\mathbf{u}_d\| + b \|\mathbf{u}_d\|^2 \quad \text{Eq. 6-1}$$

À partir de l'équation 6-1 on peut décrire de nombreux modèles rhéologiques : le modèle de Bingham (en prenant les paramètres τ_0 et a , des avalanches humides), le modèle du fluide granulaire avec friction Coulombienne (angle de friction φ), le modèle du fluide de Voellmy (paramètres φ et b), etc. Les équations intégrales non linéaires du bilan de masses et des moments pour un flux dense peuvent être décrites selon :

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 \\ huv \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \partial_x \\ \partial_y \end{pmatrix} \left(\frac{1}{2} kg \cos \theta \cdot h^2 \right) = -gh \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \theta_x \\ \cos \theta_y \end{pmatrix} - \frac{1}{\|\mathbf{u}_d\|} \begin{pmatrix} 0 \\ u \\ v \end{pmatrix} \frac{\tau}{\rho_d} \quad \text{Eq. 6-2}$$

Où h est la hauteur du flux en un point, $\mathbf{u}_d = (u, v)^t$ la vitesse du flux, θ_x et θ_y sont les angles des pentes du terrain dans les directions x et y respectivement, et k est le coefficient de pression.

La résolution numérique du système d'équations est obtenue après l'ajustement des différents paramètres qui dépendent de la qualité de la neige. Les différents résultats obtenus à partir de la résolution numérique qui sont utilisés pour la comparaison avec les signaux sismiques et les images de vidéo sont les suivants :

- Evolution de la vitesse moyenne et maximale.
- Représentation de l'évolution du front de l'avalanche au cours du temps.
- Représentation de la hauteur du flux dans un temps donné.

En étudiant les images vidéo de la zone de départ de l'avalanche de Raspes Roies, on observe que la partie qui constitue l'aérosol de l'avalanche n'arrive pas à se déposer beaucoup plus loin que la partie dense. Ce fait est totalement cohérent avec la densité de la neige mobilisée dans cette avalanche. La densité selon les données du profil stratigraphique réalisé "in situ" était de plus de 200 kg/m^3 . Pour cela, on considère que l'aérosol de l'avalanche peut être déprécié et on suppose que l'avalanche peut être modélisée comme une avalanche de neige dense.

L'application du modèle est basée sur des observations de terrain. La carte topographique de la zone fut numérisée selon une maille régulière. Compte tenu de la zone de départ définie en utilisant les images vidéo et le profil stratigraphique, caractéristiques du manteau neigeux, on obtient l'évolution de la vitesse moyenne et de la vitesse maximale, calculées pour chaque intervalle de temps sur la totalité de l'avalanche, figure 6-4. La comparaison entre l'avalanche simulée et les images vidéo nous montre que l'avalanche modélisée dure moins temps que l'avalanche observée, mais la zone d'arrivée est la même. Les bons résultats issus de la simulation, durée et extension de la zone du dépôt, nous permettent d'utiliser cette simulation pour interpréter le signal sismique de

l'avalanche. À partir de cette comparaison entre le profil de vitesse de l'avalanche simulée (figure 6-4) et le signal sismique (figure 6-3), on observe que la première partie du signal (1 dans la figure 6-3) correspond à la partie où l'avalanche arrive à sa vitesse maximale. L'étude du signal sismique montre que cette partie correspond à un changement de la pente du parcours, de 30 à 25 degrés, de même qu'un changement du type d'avalanche de dense à aérosol. La simulation nous permet aussi de conclure que la deuxième partie du signal sismique (2 dans la figure 6-3) correspond à la phase d'arrêt de l'avalanche.

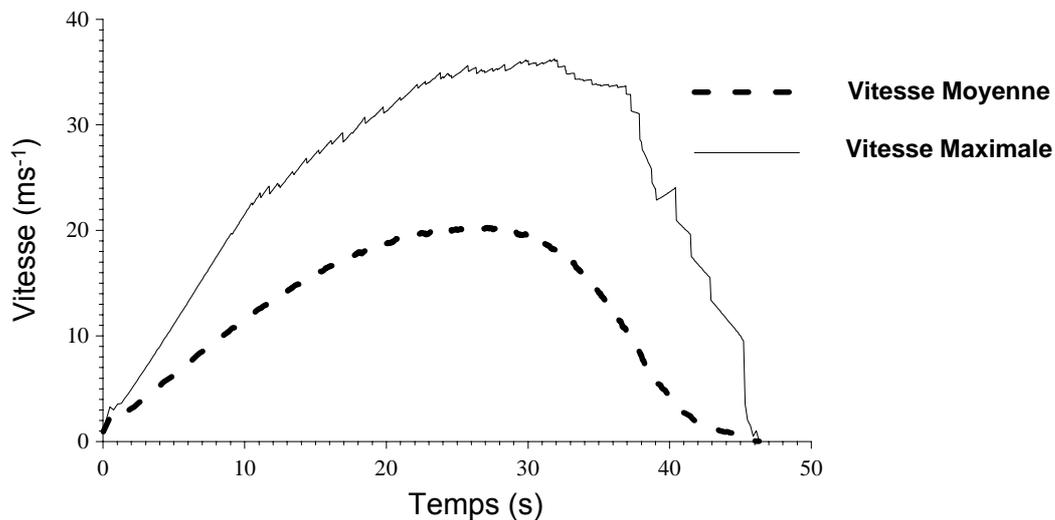


Figure 6-4. Vitesses moyenne et maximale du flux de neige pour chaque intervalle de temps calculé pour la totalité de l'avalanche (Sabot et al, 1998).

La figure 6-5 présente les résultats de l'évolution des contours de l'avalanche au cours du temps qui sont le résultat de l'application du modèle numérique de M. Naaim à partir des données de Raspes Roies.



Figure 6-5. Evolution du front de l'avalanche simulée au cours du temps (Naaim, Com. Pers.).

Sur la figure 6-6 nous pouvons apprécier le dépôt de l'avalanche de Raspes Roies. Il s'agit du résultat de l'application du modèle numérique.

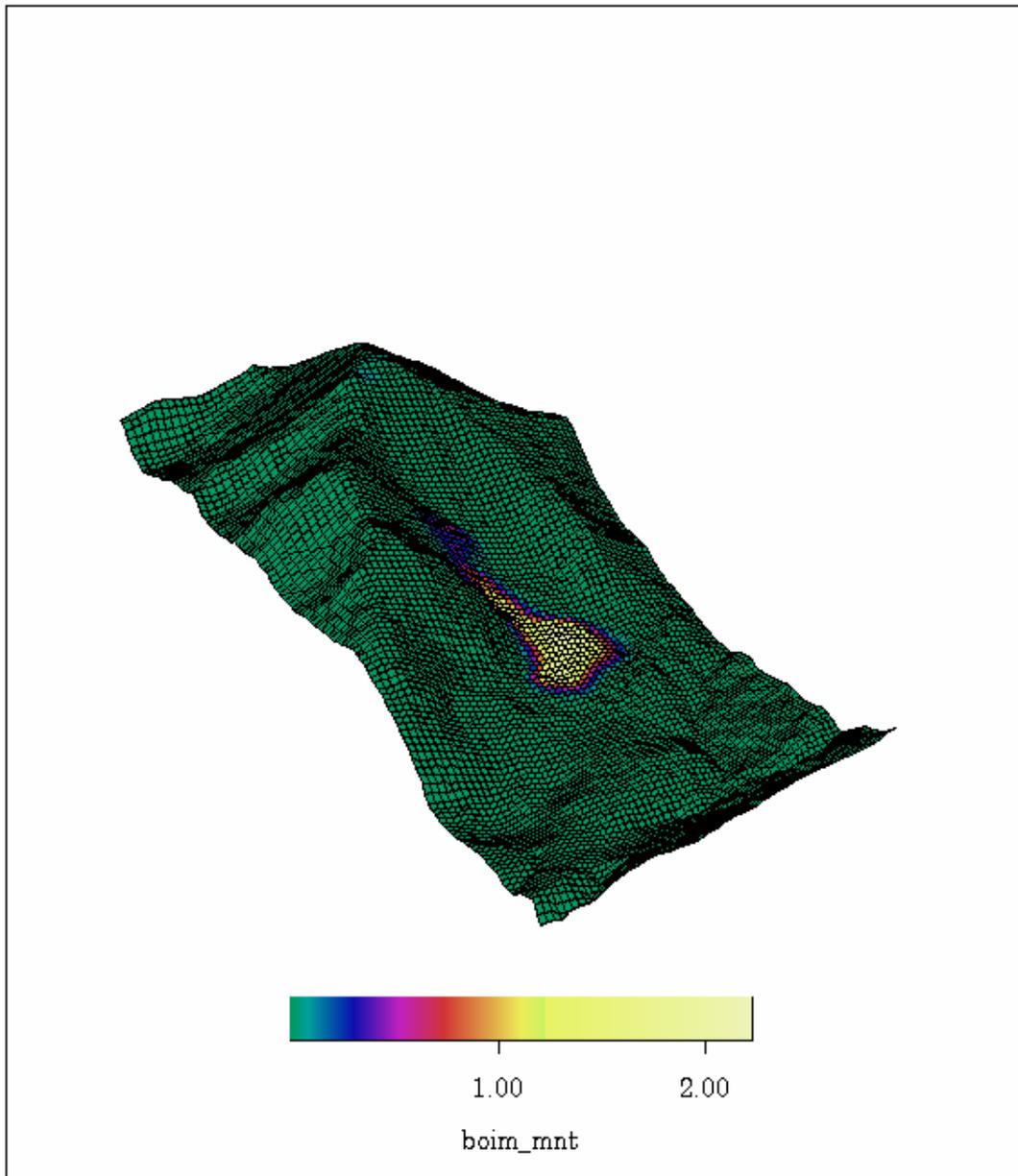


Figure 6-6. Hauteur du dépôt de l'avalanche de Raspes Roies après la simulation numérique.
Les résultats sont donnés en mètres (Naaim, Com. Pers.).

La ressemblance entre les contours de la simulation numérique de l'avalanche (figure 6-5) et les contours obtenus à partir des images vidéo (image 6-3), même si on n'a pas fait le changement de 2D à 3D, confirme la fiabilité du modèle utilisé.

6.4 Conclusions.

Sur une même avalanche, celle du Raspes Roies, nous avons appliqué trois méthodes d'analyse : analyse d'images vidéo, mesures sismiques, et modélisation numérique. Cette étude nous a permis de vérifier l'utilité des données obtenues à partir du traitement d'images sur d'autres domaines comme la sismologie ou la modélisation numérique.

À propos de l'utilité des résultats du traitement d'images dans le domaine de la sismologie, il faut remarquer comme très important l'explication du signal sismique à partir de l'observation des images. C'est à dire que si on a en même temps un enregistrement vidéo et un enregistrement sismique de la même avalanche, cela nous permettra d'essayer d'expliquer les différents trains d'ondes qui sont présents dans un signal sismique. De cette façon, et selon de nombreuses expériences, nous essayerons de généraliser les explications pour pouvoir arriver à l'interprétation des signaux sismiques en provenance des avalanches de neige naturelle, et relevés dans des stations sismiques automatiques.

À propos de l'utilité des résultats du traitement d'images dans le domaine de la modélisation numérique, il faut remarquer comme très important la possibilité de comparer les résultats des contours réels et ceux des contours provenant des modèles, et de cette façon pouvoir donner aux réalisateurs de modèles un outil de vérification de ses prédictions. De toute façon, il est nécessaire de réaliser la transformation des contours en 2D dans une représentation 3D afin de compléter la comparaison entre les résultats de la modélisation numérique et les résultats du traitement d'images.

Pour terminer, nous pouvons indiquer que même si on parle d'une première étude, cela nous donne des espoirs et laisse les portes ouvertes à l'utilité du traitement d'images dans d'autres domaines comme la sismique et la modélisation.

Conclusions.

A l'origine, ce travail avait pour objet contribuer au développement des connaissances dans le domaine de la dynamique des avalanches. Les méthodes présentées, *la cartographie des vitesses en surface, l'estimation de l'enveloppe d'une avalanche et la comparaison entre l'image, les modèles numériques et la sismique*, peuvent s'inscrire dans un cadre beaucoup plus large. En effet, ils peuvent s'appliquer dans des domaines aussi variés comme les écoulements de laves torrentielles ou les écoulements de matériaux denses tels que le gravier.

Dans ce travail, après avoir présenté les propriétés physiques de la neige, nous avons rappelé quelques notions sur les avalanches et les modèles numériques des avalanches.

Dans une deuxième partie, une analyse de différentes méthodes de traitement d'images a été présentée en abordant des problèmes tels que la détection du mouvement et l'estimation du mouvement en considérant les méthodes spatiales et les méthodes fréquentielles.

Par la suite, nous expliquerons les conclusions que nous avons extrait de l'utilisation des techniques de traitement d'images sur les avalanches de neige.

Après avoir essayé différentes méthodes classiques du traitement d'images pour construire une carte de vitesses superficielles dans une avalanche dense, nous constatons que la méthode adaptative donne les meilleurs résultats. Cette méthode nous permet de faire, automatiquement, un calcul des vitesses à la surface d'une avalanche. Ainsi, nous pouvons déterminer la zone qui nous intéresse étudier, appliquer la méthode, et extraire les résultats. Ceux-ci sont très utiles pour des travaux de modèles numériques, ou pour l'étude en profondeur de la dynamique et le comportement des avalanches.

Parallèlement, nous avons développé une méthode pour calculer la hauteur d'une avalanche dans un point de l'espace et pendant son parcours. Pour faire ce calcul, nous nous sommes aidés du support des capteurs dans le plan image capté par la caméra vidéo. Les résultats obtenus automatiquement s'adaptent aux résultats obtenus par les méthodes plus directes comme les observations sur l'écran, ou l'analyse d'une série photographique. Ces résultats nous donnent aussi une information très utile du comportement des avalanches de neige dense.

Finalement, en relation aux applications des méthodes de traitement d'images sur des avalanches de neige, nous avons développé une méthode qui permet de faire une estimation de la variation de l'enveloppe d'une avalanche au cours du temps, à partir d'un contour initial défini par l'utilisateur. Cette méthodologie nous fournit des

données pour essayer de comprendre les lois de comportement des avalanches de neige.

Voici maintenant les conclusions de la partie correspondante à la comparaison entre les résultats obtenus par traitement d'images, la sismique, et les modèles numériques d'avalanches.

Il est à noter que l'étude présentée est une comparaison de trois résultats dans trois domaines différents appliqués sur la même avalanche. Ceci à l'origine n'était pas du tout demandé et n'a donc jamais été un des objectifs du travail. C'est une voie qui s'est ouverte quand physiciens, sismologues et traiteurs d'image se sont parlés. En ceci, un projet européen est extrêmement bénéfique car il permet souvent aux gens et aux différentes disciplines de se rencontrer. Ainsi, c'est la première fois qu'un tel travail est présenté. Il était un premier pas et il faut bien sur un plus grand nombre de résultats, en travaillant dans un site expérimental identique pour tous, et en obtenant des données provenant de différents domaines, comme la modélisation, les enregistrements sismiques, et le traitement d'images (mais on peut en envisager d'autres).

Il faut considérer les résultats obtenus comme un premier essai, comme une étude de faisabilité, étant donné que nous avons travaillé sur une seule avalanche. Nous n'avons pas l'intention d'extraire des conclusions générales, mais d'ouvrir une fenêtre à de nouveaux travaux de recherche qui actuellement sont en cours.

Même si nous avons présenté des résultats, il ne faut pas oublier qu'un travail où la partie expérimentale se déroule hors laboratoire, présente certaines difficultés.

Une première difficulté est le fait de travailler dans un site réel où nous n'avons pas la possibilité de contrôler les conditions expérimentales afin de pouvoir les répéter, comme nous pourrions le faire dans un laboratoire.

Une deuxième difficulté est l'obtention des enregistrements vidéo d'avalanches (données expérimentales), étant donné qu'il s'agit d'un phénomène saisonnier. Pour cela, il nous faut la neige suffisante et la présence du soleil afin d'avoir de bonnes conditions d'éclairage.

La dernière difficulté remarquable est le fait que les images sont, inévitablement, peu contrastées. Nous travaillons avec des avalanches de neige, cela nous donne un type d'images très particulier. En effet, nous obtenons des objets déformables de couleur blanche en mouvement sur un fond blanc.

Les principales perspectives qui surgissent de ce travail sont décrites par la suite.

Il serait intéressant d'améliorer la méthode adaptative appliquée au calcul de champ de vitesses en surface d'une avalanche, surtout dans la partie dédiée à recueillir l'information de l'existence ou non de mouvement. La finalité de ce

progrès serait l'automatisation du procès pour décider s'il y a eu ou non de mouvement.

Une autre proposition d'amélioration serait le passage du calcul des vitesses en 2D au calcul en 3D. Pour cela il faut équiper les sites expérimentaux avec des points de repère et effectuer des levées topographiques. Avec se change on obtiendrait les champs de vitesses réels, et non pas sa projection sur un plan 2D.

La création d'une interface qui permet, à partir d'une série d'images numérisées, calculer la cartographie des vitesses en surface d'une avalanche, sa hauteur et le suivi de son enveloppe, aiderait à un utilisateur quelconque à travailler facilement dans ce domaine.

Une autre voie de travail s'ouvre devant la possibilité d'approfondir dans les connaissances de la comparaison image - sismique - modèles, et vérifier s'il existe une relation au-delà de la simple comparaison qualitative.

Etant donné les résultats obtenus dans le champ des avalanches de neige, on peut exporter cette méthodologie à d'autres phénomènes, comme les laves torrentielles et le charriage en rivière. Dans ces cas là, par exemple, les problèmes de manque de contraste disparaîtraient.

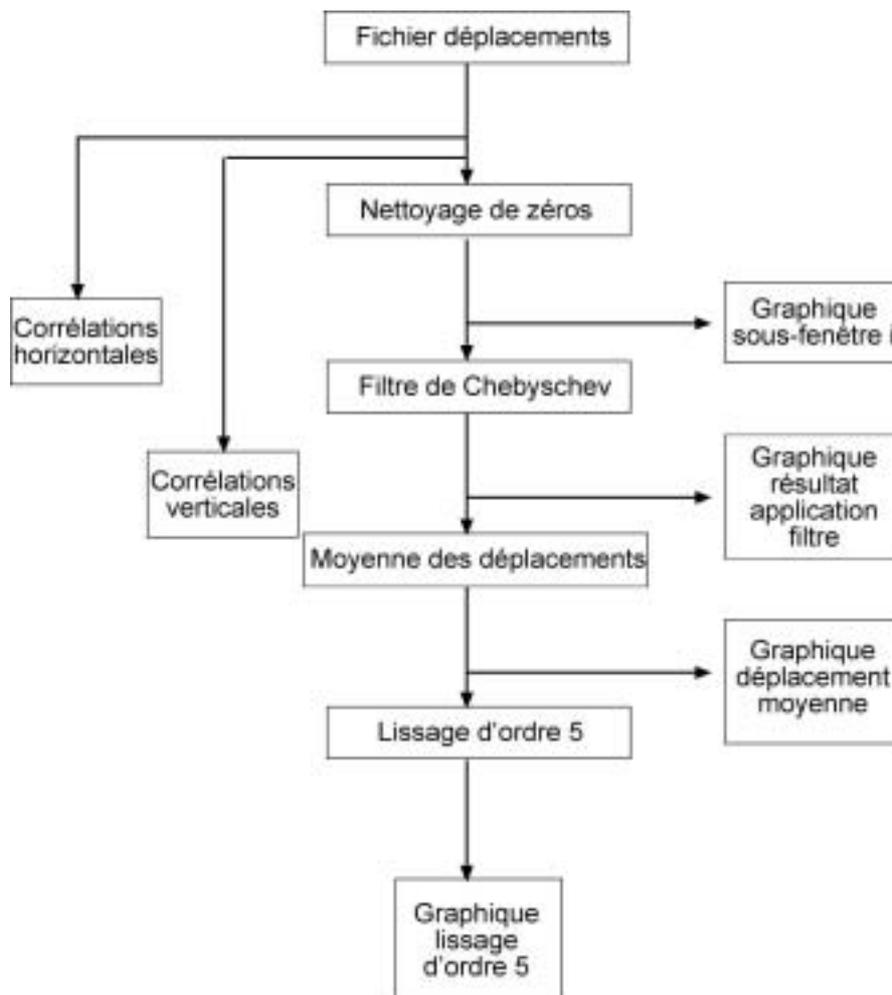
Afin de mener à terme tous ces propos, il nous faut surtout disposer de beaucoup plus de données expérimentales.

Pour finir, j'aimerais insister sur l'un des mérites de ce travail. Il s'agit de la première fois que des méthodes de traitement d'images sont utilisées pour extraire des informations relatives à la dynamique des avalanches à partir de simples enregistrements vidéo. C'est à partir des études qui commencèrent avec le vidéo que, actuellement, dans toutes les expériences de dynamique d'avalanches on utilise l'enregistrement en vidéo synchronisée dans le temps avec les autres instruments.

Annexes.

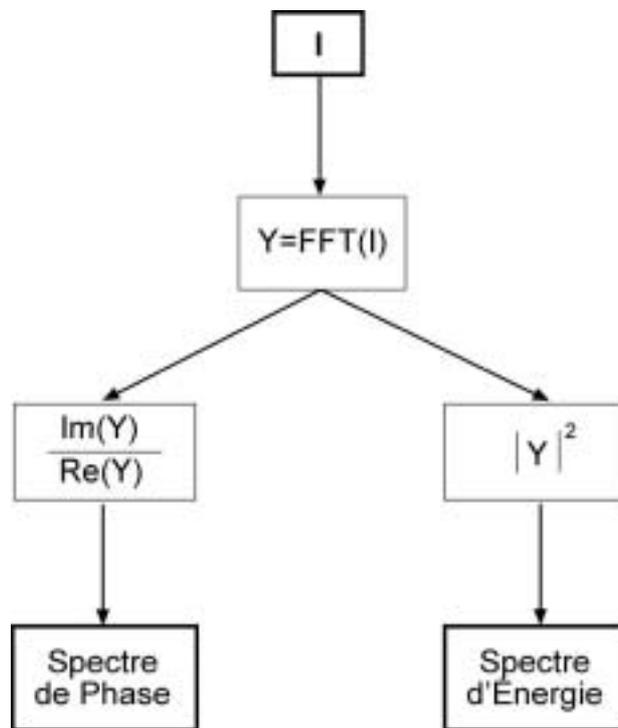
allau_mars91, allau_gener92 et allau_abril92.

Développé comme un script de Matlab.



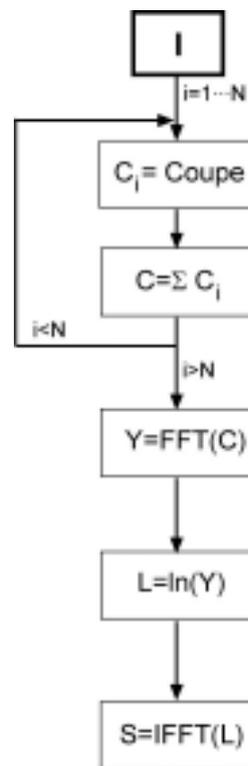
angleb.

Développé comme un script de DxlImage.



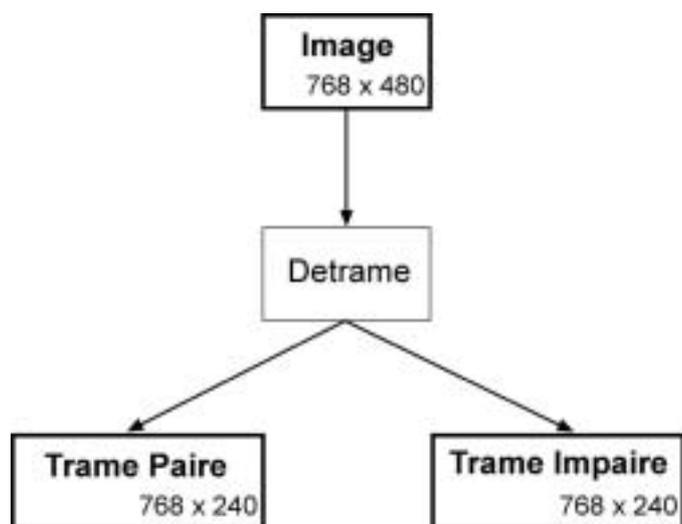
cepstrum.

Développé comme un script de DxlImage.



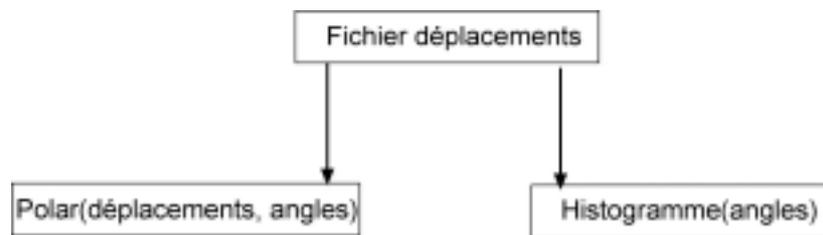
detrame.

Développé en c.



PolarRep.

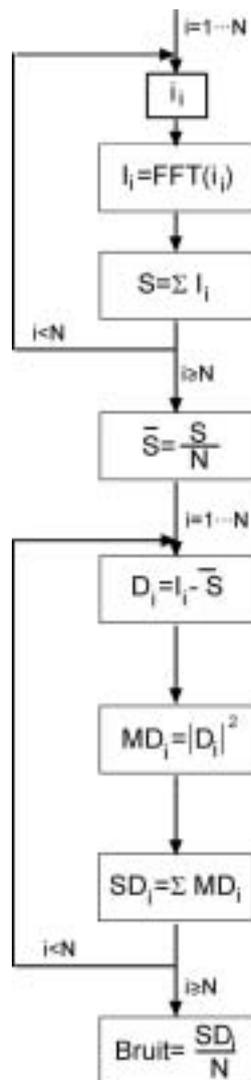
Développé comme un script de Matlab.



Polar et Histogramme sont fonctions de Matlab

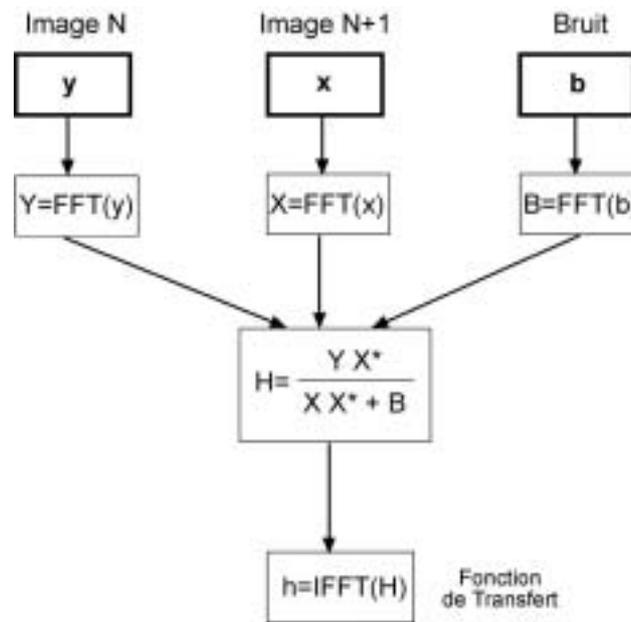
soroll.

Développé comme un script de DxlImage.



wienerb.

Développé comme un script de DxlImage.



Sommaire des Figures.

Figure 1-1. Schéma de la compression, la traction et le cisaillement.	65
Figure 1-2. Action du flux thermique de sol à la base du manteau neigeux. Selon Sergent, 1993.	65
Figure 1-3. Interaction rayonnement solaire / neige. Selon Sergent, 1993.	66
Figure 1-4. Albédo en fonction de la longueur d'onde pour différents diamètres de grains.	67
Figure 1-5. Les échanges neige - atmosphère. Selon Sergent, 1993.	68
Figure 1-6. Décomposition des mouvements de la neige en un versant. Selon Sergent, 1993. α angle de la pente. OO' sol.	71
Figure 1-7. Forces qui agissent sur le centre de gravité du fluide.	80
Figure 1-8. Périmètre et section mouillée. Ceux-ci sont utilisés pour le calcul du rayon hydraulique.	81
Figure 1-9. Profil de vitesse d'un fluide Newtonien.	82
Figure 1-10. Profil de vitesse d'un fluide binghamien.	83
Figure 3-1. a) Résultat de l'application du cepstre à l'image du carré blanc 22x22 pixels (image 3-5). On peut apprécier la symétrie du résultat dû à l'application de la transformée de Fourier, et b) une amplification de la zone correspondante au premier pic sur le point 17 et un deuxième pic sur le point 22.	116
Figure 3-2a. Résultat de l'application du cepstre à l'image du visage féminin (image 3-15b).	116
Figure 3-2b. Amplification de la figure 3-2a autour de la zone correspondante au pic (point 25).	117
Figure 3-3a. Résultat de l'application du cepstre à une image qui correspond à l'avalanche du mois de Mars 1991 (image 3-16b).	117
Figure 3-3b. Amplification de la figure 3-3 a.	118
Figure 3-4. Vitesse au milieu de la surface de l'avalanche du 15 Janvier 1992. Vitesse mesurée et vitesse lissée d'ordre 5. Axe x temps en secondes et axe y vitesse en m/s. (Marco, 1994).	120
Figure 4-1. Synoptique de la méthode de traitement.	129
Figure 4-2. Echantillon de l'avalanche de Mars 1991. Vitesse en pixels par frame (photogramme) sur une série de 178 images.	139
Figure 4-3. Echantillon de l'avalanche de Janvier 1992. Vitesse en pixels par frame sur une série de 178 images.	140

Figure 4-4. Echantillon de l'avalanche d'Avril 1992. Vitesse en pixels par frame sur une série de 178 images.	141
Figure 4-5. Vitesse de l'avalanche du 12 de Mars 91 correspondant à la sous-fenêtre n _o 1.	145
Figure 4-6. Vitesse de l'avalanche du 12 de Mars 91 correspondant à la sous-fenêtre n _o 30.	146
Figure 4-7. Vitesse de l'avalanche du 12 de Mars 91 correspondant aux sous-fenêtres 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 et 27.	147
Figure 4-8. Vitesse moyenne de l'avalanche du 12 Mars 91.	148
Figure 4-9. Vitesse moyenne de l'avalanche du 12 Mars 91. Après l'application du filtre de Butterworth.	149
Figure 4-10. Vitesse moyenne de l'avalanche du 12 Mars 91. Après l'application du filtre de Chebyshev.	149
Figure 4-11. Vitesse moyenne et résultats de l'application des filtres de Butterworth et de Chebyshev. Avalanche du 12 Mars 91.	150
Figure 4-12. Vitesse moyenne de l'avalanche du 12 Mars 91, après l'application du filtre de Chebyshev et le lissage d'ordre 5.	151
Figure 4-13. Représentation polaire Vitesse - Angle pour l'avalanche du 12 Mars 91.	152
Figure 4-14. Histogramme des angles. Avalanche Mars 91.	152
Figure 4-15. Disposition des 30 sous-fenêtres utilisées pour étudier l'avalanche de Mars 91.	153
Figure 4-16. Représentation de la superposition des sous-fenêtres 1, 2 et 16. La largeur des sous-fenêtres est de 128 x 128 pixels et le déplacement de 8 pixels.	153
Figure 4-17. Vitesse de l'avalanche du 15 Janvier 92. Sous-fenêtre n _o 1.	156
Figure 4-18. Vitesse de l'avalanche du 15 Janvier 92. Sous-fenêtre n _o 40.	157
Figure 4-19. Vitesse de l'avalanche du 15 Janvier 92 correspondant aux sous-fenêtres 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32, 35 et 38.	158
Figure 4-20. Vitesse moyenne de l'avalanche du 15 Janvier 92.	158
Figure 4-21. Vitesse moyenne de l'avalanche du 15 Janvier 92 après l'application du filtre de Butterworth.	159
Figure 4-22. Vitesse moyenne de l'avalanche du 15 Janvier 92 après l'application du filtre de Chebyshev.	160
Figure 4-23. Superposition des signaux correspondants à la vitesse moyenne de l'avalanche du 15 Janvier 92 et les résultats des applications des filtres de Butterworth et Chebyshev.	160
Figure 4-24. Vitesse moyenne de l'avalanche du 15 Janvier 92 après l'application du filtre de Chebyshev et le lissage d'ordre 5.	161
Figure 4-25. Représentation en coordonnées polaires des angles de l'avalanche du 15 Janvier 92.	162

Figure 4-26. Histogramme des angles de l'avalanche du mois de Janvier 92. ...	162
Figure 4-27. Disposition des 40 fenêtres utilisées pour étudier l'avalanche de Janvier 92.	163
Figure 4-28. Représentation de la superposition des sous-fenêtres 1, 2 et 21. La largeur des sous-fenêtres est de 64 x 64 pixels et le déplacement de 16 pixels.	163
Figure 4-29. Vitesse de l'avalanche du 10 Avril 92. Fenêtre 1.....	165
Figure 4-30. Vitesse de l'avalanche du 10 Avril 92. Fenêtre 30.....	165
Figure 4-31. Vitesse de l'avalanche du 10 Avril 92 correspondant aux fenêtres 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 et 27.....	166
Figure 4-32. Vitesse moyenne de l'avalanche du mois d'Avril 92.	166
Figure 4-33. Représentation en coordonnées polaires. Vitesses en m/s et l'angle par rapport à l'horizontale du terrain. Avalanche du 10 Avril 1992.	167
Figure 4-34. Histogramme des angles de l'avalanche d'Avril 1992.	168
Figure 4-35. Disposition des 30 fenêtres utilisées pour étudier l'avalanche d'Avril 92.	168
Figure 4-36. Représentation de la superposition des sous-fenêtres 1, 2 et 16. La largeur des sous-fenêtres est de 128 x 128 pixels et le déplacement de 8 pixels.	168
Figure 4-37. Variation de la hauteur de neige (cm) au cours du temps (s) de l'avalanche du 12 Mars 1991, au passage du support des capteurs.	171
Figure 4-38. Représentations de la hauteur et la vitesse moyenne. Les données ont été "normalisés".....	172
Figure 5-1. Différence simple d'images entre une image sans avalanche et une image avec avalanche. Avalanche poudreuse déclenchée le 15 Février de 1996 à la Vallée de la Sionne (Suisse). Dans l'axe x est représenté le numéro de pixels. Dans l'axe y (I) le niveau de gris.....	180
Figure 5-2. Coupe de l'image D. Valeur absolue de la différence. Dans l'axe x est représenté le numéro de pixels. Dans l'axe y (I) le niveau de gris.	180
Figure 5-3. Résultat de la figure 5-2 filtrée par une gaussienne de masque 3x3. Dans l'axe x est représenté le numéro de pixels. Dans l'axe y (I) le niveau de gris.	181
Figure 5-4. Recherche du contour.....	186
Figure 5-5. Profil énergétique $\alpha=0.0005$. Dans l'axe x est représenté le numéro d'itérations.	188
Figure 5-6. Profil énergétique $\alpha=0.00001$. Dans l'axe x est représenté le numéro d'itérations.	189
Figure 5-7. Algorithme de suivi.....	190
Figure 5-8. Principe de l'algorithme.....	191
Figure 5-9. Balayage horizontal gauche droite.....	192
Figure 5-10. Energie de la carte des distances.	192

Figure 5-11. Schéma des répercussions d'une erreur.....	193
Figure 5-12. Avalanche du 15 Février du 1996 à la Vallée de la Sionne. Vue de gauche.....	194
Figure 5-13. Avalanche du 15 Février du 1996 à la Vallée de la Sionne. Vue de dessus.....	194
Figure 5-14. Avalanche du 24 Février du 1996 au Col du Lautaret. Vue de gauche. Les endroits A, B et C seront expliqués dans le paragraphe 5.3.2 Interprétation et conclusion sur l'algorithme de suivi.....	196
Figure 5-15. Avalanche du 24 Février du 1996 au Col du Lautaret. Vue de dessus.	197
Figure 6-1. Topographie de l'avalanche de Raspes Roies. Zone 1, zone de formation de l'aérosol. Zone 2, phénomène associé à l'arrêt de l'avalanche. E point d'explosion (G. Furdada, Com. Pers.).....	204
Figure 6-2. Signal sismique des trois composantes de l'avalanche de Raspes Roies. Extrait de Sabot et al, 1998.....	208
Figure 6-3. Signal sismique des trois composantes de l'avalanche de Raspes Roies. Nous avons représenté les différents parties identifiées par comparaison avec les images vidéo. 1 : formation d'un aérosol dû au changement de pente. 2 : phénomène associé à l'arrêt de l'avalanche. (Sabot et al, 1998).	210
Figure 6-4. Vitesses moyenne et maximale du flux de neige pour chaque intervalle de temps calculé pour la totalité de l'avalanche (Sabot et al, 1998).	212
Figure 6-5. Evolution du front de l'avalanche simulée au cours du temps (Naaim, Com. Pers.).....	212
Figure 6-6. Hauteur du dépôt de l'avalanche de Raspes Roies après la simulation numérique. Les résultats sont donnés en mètres (Naaim, Com. Pers.).....	213

Sommaire des Images.

Image 2-1. Carte binaire des différences temporelles d'un objet en mouvement.	89
Image 2-2. a) Image floue d'un train. b) Le logarithme de le spectre extrait à partir de 32 coupes au centre du train. c) La représentation du cepstre qui nous montre un pic à $L=7$. Biemond (1990).	99
Image 3-1. Crête de Chaillol, pendant la saison d'hiver, depuis le Col du Lautaret (Hautes Alpes). On observe les couloirs d'avalanches. Photo de Francesc Granada.	104
Image 3-2. Couloir d'avalanches utilisée comme site expérimental (Col du Lautaret, Hautes Alpes). Photo de Francesc Granada.	105
Image 3-3. L'image est composée d'un calendrier en mouvement vers le haut, d'un train en mouvement vers la gauche et la caméra en mouvement vers la droite. Les déplacements sont représentés par vecteurs.	107
Image 3-4. Résultat de l'application de l'algorithme du flot optique sur une image de l'avalanche de Mars 1991.	107
Image 3-5. Image d'un carré blanc de taille 22 x 22 pixels sur un fond noir. Taille totale de l'image 256 x 256 pixels.	109
Image 3-6. Déplacement, de l'image original (image 3-5), de 17 pixels et un angle de 45 degrés.	110
Image 3-7. Déplacement, de l'image original (image 3-5), de 25 pixels et un angle de 0 degrés.	110
Image 3-8. Déplacement, de l'image original (image 3-5), de 17 pixels et un angle de 26,56 degrés.	110
Image 3-9. Spectre d'énergie de l'image 3-6.	110
Image 3-10. Spectre de phase de l'image 3-6.	110
Image 3-11. Spectre d'énergie de l'image 3-7.	111
Image 3-12. Spectre de phase de l'image 3-7.	111
Image 3-13. Spectre d'énergie de l'image 3-8.	111
Image 3-14. Spectre de phase de l'image 3-8.	111
Image 3-15. Dans cette série on voit l'image originelle (a) de 256 x 256 pixels, puis l'image déplacée de 17 pixels et un angle de 45 degrés (b), et finalement le spectre d'énergie (c) et le spectre de phase (d).	112
Image 3-16. On apprécie trois instants d'une avalanche de neige, l'avalanche se déplace de droite à gauche et de haut en bas: la première image montre la zone avant l'arrivée de l'avalanche (a); la deuxième est un instant du corps l'avalanche (b); et la troisième, la partie finale de l'avalanche (c). Toute ces images ont une taille de 128 x 128 pixels.	113
Image 3-17. Spectre d'énergie (a) et de phase (b) de l'image 3-16a.	113

Image 3-18. Spectre d'énergie (a) et de phase (b) de l'image 3-16b.	113
Image 3-19. Spectre d'énergie (a) et de phase (b) de l'image 3-16c.....	114
Image 3-20. Copie d'écran d'un corrélogramme obtenu entre deux images en utilisant le logiciel C-IMA.	119
Image 4-1. Soustraction de deux trames d'une même image. En blanc (niveau de gris 255) zones qui ont subi un déplacement et, en noir (niveau de gris 0) zones non déplacées.	125
Image 4-2. Moyenne des Fonctions de Transfert (étape 7) à partir de la procédure a).	129
Image 4-3. Image générée au hasard à partir du logiciel DxlImage.	130
Image 4-4. Déplacement entre les images 1 et 2.	131
Image 4-5. Déplacement entre les images 1 et 3.	131
Image 4-6. Déplacement entre les images 1 et 4.	131
Image 4-7. Image déplacement entre les images 1 et 5.....	132
Image 4-8. Déplacement entre les images 1 et 6.	132
Image 4-9. Déplacement entre les images 1 et 7. Taille de l'image 64 x 64 pixels.	132
Image 4-10. Image floue d'une avalanche. A gauche, en bas, un support de capteurs profilé en aile d'avion. A droite: fenêtre déterminant la portion de surface étudiée.....	135
Image 4-11. Déplacements du couple: Paire N - Paire N+1; Impaire N - Impaire N+1. La ligne blanche nous montre la direction de la pente du couloir.	136
Image 4-12. Moyenne des Fonctions de Transfert des couples. Paire N – Impaire N, Paire N+1 – Impaire N+1. Procédure b).....	136
Image 4-13. Moyenne des Fonctions de Transfert des couples. Paire N – Paire N+1, Impaire N – Impaire N+1. Procédure a).	136
Image 4-14. Vitesse (m/s) en fonction de la position (pixels). La position (0,0) correspond au coin inférieur gauche de l'image 4-11.....	137
Image 4-15. Photogramme de l'avalanche du 12 Mars 91. A gauche, en bas, un support de capteurs profilé en aile d'avion.	138
Image 4-16. Image de l'avalanche du 15 Janvier 1992. A gauche, en bas, le support de capteurs profilé en aile d'avion, en haut, fenêtre déterminant la portion de surface utilisée pour calculer la densité spectrale du bruit (utilisée ultérieurement dans l'étude temporelle). A droite : fenêtre déterminant la portion de surface étudiée.....	139
Image 4-17. Image de l'avalanche du 10 Avril 1992. A gauche, en bas, le support de capteurs profilé en aile d'avion, en haut, fenêtre déterminant la portion de surface utilisée pour calculer la densité spectrale du bruit (utilisée ultérieurement dans l'étude temporelle). A droite: fenêtre déterminant la portion de surface étudiée.....	140

Image 4-18. Image de l'avalanche du 12 Mars 1991. A gauche, en bas, le support de capteurs profilé en aile d'avion, en haut, fenêtre déterminant la portion de surface utilisée par calculer la densité spectrale du bruit. A droite : fenêtre déterminant la portion de surface étudiée.	144
Image 4-19. Image, non-détramé, de l'avalanche du 15 Janvier 92. A gauche, en bas, un support de capteurs profilé en aile d'avion, en haut, fenêtre déterminant la portion de surface utilisée pour calculer la densité spectrale du bruit. A droite: fenêtre déterminant la portion de surface étudiée.	155
Image 4-20. Image, détramé, de l'avalanche du 15 Janvier 92. Nous pouvons apprécier 3 des 40 sous-fenêtres (1, 21 et 40) utilisées pour faire les calculs de la vitesse superficielle de l'avalanche.....	156
Image 4-21. Avalanche du 12 Mars 91. On peut observer l'étrave utilisée pour le calcul de la hauteur de l'avalanche.....	170
Image 4-22. Image correspondant a l'aile binarisée. En noir l'étrave. En blanc la zone correspondant à l'avalanche.	171
Image 5-1. Image de l'avalanche poudreuse déclenchée le 15 Février de 1996 à la Vallée de la Sionne (Suisse). On peut observer aussi la coupe utilisée pour essayer de déterminer la présence de l'écoulement.	179
Image 5-2. Image qui nous montre le contour choisi comme contour initial.	187
Image 5-3. Contour final en prenant $\alpha=0.0005$	187
Image 5-4. Contour intermédiaire en prenant $\alpha=0.00001$	187
Image 5-5. Contour final en prenant $\alpha=0.00001$	187
Image 5-6. 7 ^{ème} contour.....	195
Image 5-7. 23 ^{ème} contour.....	195
Image 5-8. 43 ^{ème} contour.....	195
Image 5-9. Image montrant la déflagration qui sera la cause de l'avalanche.	197
Image 5-10. Image montrant le contour initial.	198
Image 5-11. Contour à moitié du parcours.	198
Image 5-12. Contour final.	198
Image 5-13. Différents contours, un chaque seconde, entre le premier et le dernier. Nous pouvons apprécier l'évolution du front de l'avalanche.	199
Image 6-1. Image du début de la séquence. Image 1. Contour initial.....	205
Image 6-2. Dernière image de la séquence. Image 125. Contour final.....	205
Image 6-3. Différents contours entre le premier et le dernier. Nous pouvons apprécier l'évolution du front de l'avalanche.....	205

Sommaire des Tables.

Tableau 1-1. Critères descriptifs des avalanches du projet CEN–Cemagref (Rapin et Pahaut, 2000).....	78
Tableau 4-1. Relation des déplacements que nous avons provoqué sur l'image test.....	130
Tableau 4-2. Résultats de l'application des trois méthodologies de seuillage. ...	134
Tableau 4-3. Paramètres utilisés pendant le traitement numérique des avalanches étudiées. OÙ: No. Imag : Numéro d'images composant la série. T.Z.E : Taille de la zone étudiée (en pixels). T. Fenêt. : Taille des sous-fenêtres utilisées (en pixels). d : déplacement des sous-fenêtres (en pixels). No. Fenêt. : Numéro de sous-fenêtres pour chaque image. T. p. (cm) : Taille du pixel en cm (résolution de l'image).....	138
Tableau 4-4. Comparaison des vitesses des trois avalanches dans les différents intervalles.	141
Tableau 4-5. Matrice de corrélation horizontale entre les sous-fenêtres 3, 6, 9, 12, et 15.	154
Tableau 4-6. Matrice de corrélation horizontale entre les sous-fenêtres 18, 21, 24, 27, 30.	154
Tableau 4-7. Matrices résultat des corrélations verticales entre les sous-fenêtres 3 et 18, et 9 et 24.....	154
Tableau 4-8. Matrices résultats des corrélations verticales entre les sous-fenêtres 15 et 30.	154
Tableau 4-9. Matrice de corrélation horizontale entre les sous-fenêtres 2, 5, 8, 11, 14, 17 et 20.	163
Tableau 4-10. Matrice de corrélation horizontale entre les sous-fenêtres 22, 25, 28, 31, 34, 37 et 40.....	164
Tableau 4-11. Matrices résultat des corrélations verticales entre les sous-fenêtres 2 et 22, et 8 et 28.....	164
Tableau 4-12. Matrices résultats des corrélations verticales entre les sous-fenêtres 14 et 34, et 20 et 40.....	164
Tableau 4-13. Matrice de corrélation horizontale entre les sous-fenêtres 3, 6, 9, 12 et 15.	169
Tableau 4-14. Matrice de corrélation horizontale entre les sous-fenêtres 18, 21, 24, 27 et 30.	169
Tableau 4-15. Matrices résultat des corrélations verticales entre les sous-fenêtres 3 et 18, et 9 et 24.....	169
Tableau 4-16. Matrices résultats des corrélations verticales entre les sous-fenêtres 15 et 30.	169
Tableau 4-17. Corrélation entre la hauteur de l'avalanche et la vitesse moyenne.	173

Bibliographie.

- Ancey, C. (1996). *Guide Neige et Avalanches : Connaissances, Pratiques, Sécurité*. Edisud, Aix-en-Provence.
- Bagnold, R.A. (1954). *Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid shear*. Proceedings Royal Society of London. Vol. 225. pp 49-63.
- Bagnold, R.A. (1956). *The flow of cohesionless grains in fluids*. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Vol. 249. pp 235-297.
- Bascle B. and Deriche R. (1994). *Region tracking through image sequences*. Proc. Int. Conf. Computer Vision, pp. 302-307, Boston, USA.
- Batchelor, G.K. (1989). *A brief guide two-phase flow, in Theoretical and Applied Mechanics*. P. Germain, J.M. Piau and D. Caillerie (Ed.). pp 27-40. Elsevier Science Publishers. North Holland.
- Berger M.O. (1991). *Les contours actifs : modélisation, comportement, convergence*. Thèse INPL, Nancy.
- Biemond, J. Van der Putten, F.G. et Woods, J.W. (1988). *Identification and restoration of images with symmetric noncausal blurs*. IEEE Trans. Circ. Syst. Vol CAS-35. pp 385-393.
- Biemond, J., Lagendijk, R.L. et Mersereau, R.M. (1990). *Iterative methods for image deblurring*. Proceedings of the IEEE. Vol 78. No 5. pp 856-883.
- Bilbro, Griff L., Mann, R., Miller, T., Snejder, W., Van den Bout, D. et M. White, (1988). *Optimization by Mean Field Annealing*, Advances in Neural Information Processing Systems, Touretzky Ed., Vol 1, 1988, pp 91-98
- Bilbro, Griff L., Wesley E. Snyder, Stephen J. Garnier, James W. Gault (1992). *Mean field annealing: a formalism for constructing GNC-Like algorithm*, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol 3, No°1, January 1992, pp 131-138
- Bonnet, G. (1980). *Détection d'avalanche par méthode sismique*. Revue de l'A.N.E.N.A.. No. 24. pp. 30-41.
- Bouthemy P. (1988). *Modèles et méthodes pour l'analyse du mouvement dans une séquence d'images*. T.S.I. Techniques et Sciences Informatiques, vol. 7, No. 6, pp. 527-546.
- Brandstätter, W., Hagen, F., Sampl, P. et Schaffhauser, H. (1992). *Dreidimensionale Simulation von Staublawen unter Berücksichtigung realer Geländeformen*. Wildbach und Lawinenverbau. Vol. 56. No. 120. pp 107-129.
- Brugnot, G. et Vila, J.P. (1985). *Investigation théorique et expérimentale des caractéristiques dynamiques des avalanches de neige dense*. La Houille Blanche. Vol. 2. pp 133-142.

- Cohen L.D. (1990). *Note on Active Contour Models and Balloons*. CVGIP: Image Understanding, Vol 53, No°2, pp 211-218.
- Cootes T., Taylor C.J., Cooper D.H., Graham J. (1994). *Active shape models, their training and applications*. CVGIP : Image understanding, Vol.61, No. 1, pp. 38-59.
- Dent, J.D. et Lang, T.E. (1983). *A biviscous modified Bingham model of snow avalanche motion*. Ann. Glaciol., 4, pp 42-46.
- Dubois E. (1992). *Motion-Compensated Filtering of Time-Varying Images*. Multidimensionnal Systems and Signal Processing, 3, pp. 211-239. Kluwer Academic Publishers, Boston. Manufactured in the Netherlands.
- Eglit, M.E. (1983). *Some mathematical models of snow avalanches*. In : Advances in the Mechanics and the Flow of Granular Materials. Vol. 2. pp 57-588 (Shahinpoor, M., ed.), Trans Tech Publ. Clausthal – Zellerfeld et Gulf Publ. Co. Houston, Texas.
- Elomary Y. (1994). *Modèles déformables et multirésolution pour la détection de contours en traitement d'images*, Thèse d'Université, Mathématiques appliquées, Grenoble.
- Emery W.J., Thomas A. C. et Collins J. (1986). *An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared images*. J. Geophys. Res., vol 91 C11, pp 12865-12878.
- Eybert-Bérad, A., Perroud, P., Brugnot, G., Mura, R. et Rey, L. (1978). *Mesures dynamiques dans l'avalanche - résultats expérimentaux de col du Lautaret (1972 - 1978)*. Comptes rendus "2^{ème} rencontre internationale sur la neige et les avalanches", Grenoble, ANENA (Ed.), pp. 203-224.
- Fayolle J., Ducottet C., Azema J., Moine M. (1995). *Etude de différentes méthodes de traitement d'images pour la mesure de déformations d'un nuage de particules*. 6^o colloque national de visualisation et de traitement d'images en mécanique des fluides. Saint-Etienne.
- Fayolle, J. (1996). *Etude d'algorithmes de traitement d'images pour l'analyse du mouvement d'objets déformables, application à la mesure de vitesses d'écoulement*. Thèse de doctorat, Université de saint Etienne, 18 décembre 1996.
- Fournel, T., Daniere, J., Moine, M., Pigeon, J., Courbon, M. et Schon, JP. (1992). *Utilisation du cepstre d'énergie pour la vélocimétrie par images de particules*. Traitement du signal. Vol. 9, No. 3, pp 257-271.
- Fournel, T., Fayolle, J. Et Schon, JP. (1996). *Comportements en VIP de la corrélation, du cepstre et de l'identification*. 5 congrès francophone de vélocimétrie laser. Rouen 1996.
- Föhn, P. (1995). *Mountain Meteorology*. À Brugnot, G (Ed.) *UEE Risques Naturels. Neige et Avalanches*. CEMAGREF éditions. pp. 39-49.
- Furdada, G. (1996). *Estudi de les allaus al Pirineu Occidental de Catalunya : Predicció espacial i aplicacions de la cartografia*. Tesi doctoral de la Universitat de Barcelona.

- Garcia C.A.E. et Robinson S. (1989). *Sea surface velocities in shallow seas extracted from sequential coastal zone color scanner satellite data*. J. Geophys. Res, vol 94, no C9, pp 12681-12691.
- Glazer, F., Reynolds, G. et Anandan, P. (1983). *Scene matching by hierarchical correlation*. Proceedings of IEEE Conference on computer vision and pattern recognition. PP 432-441.
- Gonzalez, R.C. et Wintz, P. (1982). *Digital Image Processing*. Fifth printing. Addison-Wesley Publishing Company.
- Granada, F., Marco, O. et Villemain, P. (1995). *Utilisation de techniques de traitement d'images pour la cartographie des vitesses à la surface d'une avalanche dense*. La Houille Blanche, 5/6, pp. 66-75.
- Gubler, H. (1995). *Measurements and modelling to improve our understand of avalanche formation*. À Brugnot, G (Ed.) *UEE Risques Naturels. Neige et Avalanches*. CEMAGREF editions. pp 89-98.
- Gubler, H. (1987). *Measurements and Modelling of Snow Avalanche Speeds*. IAHS Publication. No. 162. pp 405-420.
- Gubler, H. (1993). *Dense-flow avalanches, a discussion of experimental results and basic processes*. Comptes rendus " International Workshop on Gravitational Mass Movements", Grenoble, L. Buisson (Ed.), pp. 126-127.
- Guyomarch, G. (1993). *Elements de nivologie : Les Avalanches*. ANENA. Edition Novembre 1993. pp. 27-35.
- Harbitz, C. B., Issler, D., Keylock, C. J., 1998. *Conclusions from a recent survey of avalanche computational models*. In: Hestnes, E. Editor, 25 years of snow Avalanche research, Voss, Norway; Pub. 203 N-0806 Oslo, Norwegian Geotechnical Institute, pp 128-139.
- Helmholtz, H (1925). *Physiological optics*. Vol. 3, third Ed., JPC Shouthall, trans., Optical Soc. America, Menasha, Wis.
- Hermann, F., Issler, D. et Keller, S. (1993). *Numerical Simulations of Powder-Snow Avalanches and Laboratory Experiments on Turbidity Currents*. Actes de l'Atelier International Pierre Beghin sur les Mouvements Gravitaires Rapides. Grenoble.
- Hopfinger, E.J. (1983). *Snow avalanche motion and related phenomena*. Ann. Rev. Fluid Mech. 15. pp 45-76.
- Horn B.K.P. et Schunk B.G. (1981). *Determining Optical Flow*. Artificial Intelligence. Vol. 17, No. 1-3, pp 185-203.
- Hsu Y.Z., Nagel G. et Reckers G. (1984). *New likelihood test Methods for change detection in Image Sequences*. Computer Vision, Graphics and Image Processing, CVGIP-26, pp. 73-106.
- Huang T.S. (1981). *Image Sequence Analysis*. Edition Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Huang T.S., Schreiber W.F. et Tretiak O.J. (1971). *Image Processing*. Proc. IEEE. Vol. 59. pp 1586-1609.

- Huang, HT., Fiedler, HE. et Wang, JJ. (1993). *Limitation and improvement of PIV. Part I: Limitation of conventional techniques due to deformation of particle image patterns*. Experiments in fluids. Vol. 15, pp 168-174.
- Hutter, K. et Savage, B.B. (1988). *The motion of a finite mass of gravel down a mountain*. Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides. Lausanne. Suisse.
- Issler, D. (1998). *Modelling of snow entrainment and deposition in powder snow avalanches*. Annals of Glaciology. Vol. 26.
- Jambunathan, K., Ju, XY., Dobbins, BN. et Ashforth-Frost, S. (1995). *An improved cross correlation technique for particle image velocimetry*. Measurement sci. Technology. Vol. 6, pp 507-514.
- Kass M., Witkin A., et Terzopoulos D. (1987). *Snakes: Active contour models*. Proceedings of First International Conference on Computer Vision, pp. 95-99.
- Keane, RD. et Adrian, RJ. (1992). *Theory of cross correlation analysis of PIV images*. Applied scientific research. Vol. 49, pp 191-215.
- Keller, S., Ito, Y. et Nishimura, K. (1998). *Measurements of the velocity distribution in Ping-Pong-ball avalanches*. Annals of Glaciology. No. 26, pp 259-264.
- Kervrann C. et Heitz F. (1995). *Robust tracking of stochastic deformable models in long image sequences*. Proc. 1st IEEE International Conference on Image Processing, pp 88-92, Austin, Texas, USA.
- Kok Fung Lai. (1994). *Deformable Contours: Modeling, Extraction, Detection and Classification*. Thèse de l'université de Wisconsin-Madison.
- Kunt, M. (1981). *Traitement numérique des signaux*. Dunod. Editions Georgi. ISBN Georgi 2-88074-060-6.
- Lalande P. (1990). *Détection de mouvement dans les séquences d'images selon une approche markovienne*.
- Lang, T.E., Dawson, K.L. et Martinelli, M.J. (1979). *Application of numerical transient fluid dynamics to snow avalanche flow - Part I - Development of computer program AVALANCH*. Journal of Glaciology. Vol. 22. No. 86. pp 107-115.
- Latombe B. (1996). *Etude de la dynamique des avalanches par traitement d'images*. Rapport du D.E.A. Images. Université de St. Etienne.
- Latombe, B., Ladret, P., Granada, F. et Villemain, P. (1997). *An original active contour algorithm applied to snow avalanches*. Sixth International Conference on Image Processing and its Applications, Trinity College, Dublin, Ireland, du 14 au 17 de juillet de 1997. Conference and Exhibitions Services IEE.
- Laurent J. et Latombe B. (1996). *Etude du suivi d'objets en mouvement sur une séquence d'images*. Rapport projet du DEA Image de l'université de St Etienne.
- Leese J.A. et Novak C.S. (1971). *An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation*. J. Appl. Meteorol., vol 10, pp 118-132.

- Leprettre, B. (1996). *Reconnaissance de signaux sismiques d'avalanches par fusion de données estimées dans les domaines temps, temps-fréquence et polarisation*. Thèse de l'Université Joseph Fourier. Grenoble. France.
- Leprettre, B., Navarre, J.P. et Taillefer, A. (1996). *First Results from a pre-operational system for automatic detection and recognition of seismic signals associates with avalanches*. J. Glaciol., 42 (141), 353-363.
- Maeno, O. (1993). *Rheological characteristics of snow flows*. Comptes rendus "International Workshop on Gravitational Mass Movements", Grenoble. L. Buisson (Ed.), pp 209-220.
- Marco, O. (1994). *Instrumentation d'un site avalancheux. De l'utilisation des propriétés acoustiques de la neige et des techniques d'imagerie pour la mesure de paramètres physiques d'une avalanche dense*. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier-Grenoble 1.
- Martinet, G. (1992). *Contribution à la modélisation numérique des avalanches de neige dense et des laves torrentielles*. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier.
- Maurizot M., Bouthémy P., Deylon B., Juditski A. et Odibez, J.M. (1995). *Determination of Singular Points in 2D Deformable Flow Field*. 2nd IEEE International Conference on Image Processing, Arlington, USA.
- Meynard R. (1983). *Mesures de champs de vitesses d'écoulements fluides par analyse de suites d'images obtenues par diffusion d'un feuillet lumineux*. Thèse de doctorat. Université libre de Bruxelles.
- McClung, D. et Schaerer, P. (1993). *Avalanche Handbook. The mountaineers*. 272 p.
- McClung, D.M. et Mears, A.I. (1995). *Dry-flowing avalanche run-up and run-out*. Journal of Glaciology. no. 41 (138). pp 359-372.
- Mears, A.I. (1980). *A fragment-flow model of dry-snow avalanches*. Journal of Glaciology. Vol. 26. No. 94. pp 153-163.
- Mears, A.I. (1992). *Snow Avalanche Hazards Analysis for Land-Use Planning and Engineering*. Colorado Geological Survey. Dpt. of Natural Resources. Bulletin 49. Denver Colorado. 54 p.
- Naaim M. et Ancey C. (1995). *Modelisation of dense avalanches*. In: Brugnot, G. ed. European Summer University on Natural Hazards: snow and avalanches, Cemagref Ed., pp. 173-181.
- Naaim, M. (1995). *Modélisation numérique des avalanches aérosols*. La Houille Blanche. No. 5/6. pp 56-62.
- Ninnis R.M., Emery W.J. et Collins M.J. (1986). *An automated extraction of pack ice motion from Advanced Very High Resolution Radiometer imagery*. J. Geophys. Res, vol 91, no C9, pp. 10725-10734.
- Nishimura, K. et Maeno, N. (1987). *Experiments on snow-avalanche dynamics*. IAHS. Publ. no. 162. pp 395-404.
- Nishimura, K., Maeno, N., Kawada, K. et Izumi, K. (1993a). *Structures of snow cloud in dry snow avalanches*. Annals of Glaciology. Vol. 18. pp 173-178.

- Nishimura, K., Maeno, N., Sandersen, F., Kristensen, K., Norem, H. et Lied, K. (1993b). *Observations of the dynamics structure of snow avalanches*. Annals of Glaciology. No. 18. pp 313-316.
- Nishimura, K. et Izumi, K. (1997). *Seismic signals induced by snow avalanche flow*. Natural Hazards. No. 15. pp 89-100.
- Nishimura, K., Ito, Y., Keller, S. et McElwine, J. (1998). *Snow avalanches dynamics : observations and experiments*. In: Hestnes, E. Editor, 25 years of snow Avalanche research, Voss, Norway; Pub. 203 N-0806 Oslo, Norwegian Geotechnical Institute, pp 192-197.
- Norem, H. (1991). *Simulation of snow avalanche flow by a continuum granular model*. Rapport NGI.
- Nunez, J. et Llacer, J. (1993). *A General Bayesian Image Reconstruction Algorithm with Entropy Prior. Preliminary Application to HST Data*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific. Vol 105. pp 1192-1208.
- Olivera, C., Martínez, P. et Gavaldà, J. (1995). *Enregistrament d'allaus mitjançant un sismògraf. Resum d'activitats i anàlisi de dades del període 1988-1994*. Informe intern I.C.C. GA64.
- Oppenheim A.V. et Schafer R.W. (1974). *Digital Signal Processing*. ch 10. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall.
- Perla, R., Cheng, T.T. et McClung, D.M. (1980). *A two-parameter model of snow-avalanche motion*. Journal of Glaciology. Vol. 26. No. 94. pp 197-207.
- Planet P. (1994). *Algorithmes et architectures cellulaires pour le traitement d'images*. Thèse de l'I.N.P.G., Grenoble, 1994, pp 103-116.
- Planet P., Latombe B. et Granada F. (1999). *Active contour algorithm: An attractive tool for snow avalanche analysis*. Signal Processing. No. 79. pp 197-204.
- Poggio T., Torre V. et Koch C. (1985). *Computational vision and regularization theory*. Nature Vol. 317, pp. 314-319. 26 Septembre.
- Quervain de M.R., Crecy de L., Lachapelle, E.R., Losev, K. et Shoda M. (1973). *Avalanche Classification* proposal of the Working Group on Avalanche Classification of the International Commission on Snow and Ice hydrological Sciences Bulletin XVIII 4.
- Rapin F. et Pahaut E. (2000). *Universitat Europea d'Estiu de riscos naturals. Neu i allaus. Mòdul 2. Classificació de les allaus*. Salardú, Val d'Aran (Catalunya).
- Renaudin M. (1990). *Architecture VLSI pour le codage d'images*. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Rey L. (1976). *La neige, ses metamorphoses, les avalanches*. 2^{ème} edition ANENA (Ed.) Grenoble. 212 p.
- Rom R. (1975). *On the Cepstrum of Two-Dimensional Functions*. IEE Transactions on information theory. Vol. IT-21. No. 1.

- Sabot F., Naaim M., Granada F., Suriñach E., Planet-Ladret P. i Furdada G. (1997). *Estudio de la dinámica de aludes de nieve mediante métodos sísmicos, técnicas de tratamiento de la imagen y modelos numéricos*. 1er Seminario Iberoamericano sobre Nuevas Tecnologías y gestiones de Catastrofes. Madrid, 22 a 26 de septiembre de 1997.
- Sabot F., Martinez P., Suriñach E., Olivera C. et Gavaldà J. (1995). *Détection sismique appliquée à la caracterisation des avalanches*. ANENA-CEMAGREF (Eds) : Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanches. Actes du colloque. Chamonix, 19-24.
- Sabot F., Naaim M., Granada F., Suriñach E., Planet P. et Furdada F. (1998). *Study of avalanche dynamics by seismic methods, image-processing techniques and numerical models*. Annals of Glaciology. No. 26. pp 319-323.
- Salm, B. (1983). *Guide pratique sur les avalanches*. Club Alpin Suisse. Burg. 148 p.
- Salm, B., Burkard, A. et Gubler H.U. (1990). *Berechnung von Fließlawien Eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen*. Rapport Eidgenössisches Institut für Schnee und Lawinenforschung. Traduction Ancey, C.
- SAME model survey report (1998). *A survey of computational models of snow avalanche motion*. (Harbitz, C. Ed.). Norwegian Geotechnical Institute.
- SAME (2000). Glossary (cdrom) en Avalanche mapping, model validation and warning systems. Office for official Publications of the European Comunity. ISBN-92-828-9955-1. CAT : CG-NA-19-069-EN-Z.
- SAME (2000). *A survey of computational of snow avalanche motion* en Avalanche mapping, model validation and warning systems. Office for official Publications of the European Comunity. ISBN-92-828-9955-1. CAT : CG-NA-19-069-EN-Z.
- Sergent, C. (1993). *Propriétés physiques de la neige*. CEN, Météo France. pp. 17-26.
- Sergent, C. (1995). *Effets of meteorological parameters on the snow stability*. À Brugnot, G (Ed.) *UEE Risques Naturels. Neige et Avalanches*. CEMAGREF editions. pp. 111-120.
- Singh, A. (1992). *Optical flow computation. A unified Perspective*. IEEE Computer Society press.
- St Lawrence, W.F. et Williams, T.R. (1976). *Seismic signals associated with avalanches*. Journal of Glaciology. Vol. 17. No. 77. pp 521-526.
- Stockham T.G., Cannon T.M. et Ingebrestsen R.B. (1975). *Blind deconvolution through digital signal procesing*. Proc. IEEE. Vol 63, pp 678-692.
- Suriñach, E. et Sabot, F.(1999). *Análisis de señales sísmicas producidas por aludes de nieve*. In: J. Dávila and A. Pazos (ed.). 100 años de observaciones sismológicas en San Fernando 1898-1998. Boletín del Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) N° 5/99. San Fernando, Cádiz, 189-202. ISSN 1131-5040. NIPO 076-99-024-4. D.L. CA 832-86.

- Suriñach, E., Sabot, F., Furdada, G., and Vilaplana, J.M., (1999). *Seismology as a tool for the detection of snow avalanches. Implications for the mitigation of this natural risk.* [cdrom]. In: J.M. García and M.D. Romacho, ed.. International Symposium: Assessment and reduction of natural risk. I Ass. Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Almería, I.G.N., Madrid, ISBN 84-95172-01-0, file SIM1_06.doc.
- Terzopoulos D. (1987). *On matching deformable models to images.* Topical Meeting on Machine Vision, pp. 160-167. *Technical Digest Series*, Vol.12, Optical Society of America.
- Van Trees H.L. (1968). *Detection, Estimation and Modulation Theory.* Part 1. Wiley. New York.
- Voellmy, A. (1955). *On the destructive force of avalanches.* Translated by Tate R.E., U.S. Department of Agriculture. Forest Service.
- Ward, R.K. (1993). *Restoration of differently blurred versions of an image with measurement errors in the PSF's.* IEEE Transactions on image processing. Vol. 2. No. 3. pp 369-381.
- Willert, CE. et Gharib, M. (1991). *Digital particle image velocimetry.* Experiments in fluids. Vol. 10, pp 181-193.
- Williams D.J. et Shah M. (1991). *A Fast Algorithm for Active Contours and Curvature Estimation.* CVGIP: Image Understanding. Vol 55, N°1. pp 14-26.
- Wiscombe, W. et Warren, S.G. (1980). *A model for the spectral albedo of snow. I. Pure snow.* Jour. of Atm. Sciences.
- Wu Q.X., Pairman D., McNeill S.J. et Barnes E.J. (1992). *Computing Advective Velocities from Satellite Images of Sea Surface Temperature.* IEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol 30, no 1, pp 166-175.