

3 Estimation de la vitesse en surface d'une avalanche dense.

3.1 Introduction.

L'étude de mouvements par traitements de séquences d'images n'a réellement été développée qu'à la fin des années 80 mais les applications sont surtout orientées vers la détermination des paramètres de mouvement d'objets indéformables ou sur la texture du mouvement de fluides matérialisée par des particules en suspension.

Je voudrais d'abord insister sur l'importance et la complexité de l'instrumentation d'un site réel. Celles-ci, sont exposées dans la thèse d'Olivier Marco (Marco, 1994) intitulée *Instrumentation d'un site avalancheux*.

D'après Marco (Marco, 1994), la décision d'instrumenter un site avalancheux pour réaliser des mesures de terrain est prise dans le cadre d'une réflexion globale qui tente de répondre entre autres à la question suivante : Pourquoi étudier les avalanches? La réponse à cette question serait que les objectifs sont la prévention de ce risque naturel une prévision des avalanches et une diminution de leurs effets négatifs.

Avec le développement de l'informatique et des techniques de traitement d'images, il paraît intéressant de vérifier s'il est possible d'obtenir plus d'informations concernant la dynamique des avalanches à partir d'un film vidéo standard.

L'objet de ce chapitre est de proposer un outil permettant d'obtenir une cartographie des vecteurs vitesses à la surface de l'écoulement d'une avalanche à partir d'un film vidéo et il est né à partir de l'étude de faisabilité réalisé par Marco (Marco, 1994).

Dans ce chapitre nous présentons les conditions des prises de vues in situ. Par la suite nous analysons les résultats obtenus en appliquant les méthodes spatiales, concrètement le flot optique. Après, nous analysons les résultats obtenus en appliquant les méthodes fréquentielles, le spectre de phases, le cepstre et l'intercorrélacion d'images. Le développement théorique de ces deux méthodes a été réalisé dans le chapitre précédent.

3.2 Obtention des données.

Le site expérimental est situé au Col du Lautaret (Hautes Alpes) sur des pentes exposées au Sud Est et dominées par la crête de Chaillol (image 3-1). Les altitudes de départ des avalanches sont comprises entre 2.300 et 2.600 m et les zones d'arrêt se trouvent vers 2.100 m.



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.

Ce site est utilisé depuis 1972. Il a été équipé à l'origine par la Division Nivologie du CTGREF (devenu Cemagref) avec la collaboration du Laboratoire d'Applications Spéciales de la Physique du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble (CENG). En 1989, un support de capteurs profilé en aile d'avion a été installé dans un couloir (image 3-2) par la Division Nivologie du Cemagref. En 1992, tout en respectant les contraintes de topographie et de sécurité, une plateforme, permettant de placer la caméra dans une position prédéfinie quelle que soit l'importance du manteau neigeux, a été installée en rive gauche de ce même couloir pour permettre la réalisation de films vidéo.



Image 3-2. Couloir d'avalanches utilisée comme site expérimental (Col du Lautaret, Hautes Alpes). Photo de Francesc Granada.

En Janvier 1991, un équipe de la division nivologie du Cemagref mené par O. Marco, a filmé une avalanche déclenchée artificiellement. La caméra était située à environ 400 m le long d'une perpendiculaire à l'axe de l'écoulement afin de se situer en dehors de la zone dangereuse. Dans ce cas la topographie du lieu ne permettait pas de visualiser la partie canalisée de l'écoulement. En Mars 91, ils ont refait une tentative en se plaçant sur la rive gauche du couloir. Ils ont ainsi obtenu une vue latérale et plongeante sur la surface de l'écoulement. Deux autres essais concluants en Janvier 92 et Avril 92 leur ont permis de confirmer la possibilité de faire des prises de vues à partir de cette rive. Il s'agit des trois films d'avalanches que nous allons utiliser dans notre étude du calcul des vitesses en surface d'une avalanche de neige dense.

Malheureusement pendant les hivers des années 94, 95 et 96 seulement trois avalanches ont pu être enregistrées, aucune l'an 94, deux l'an 95 et une en 96. Mais aucune de trois n'est exploitable pour nous. En 95, la première fut une avalanche de poudreuse, celle-ci est inutilisable par l'observation des vitesses en surface de l'écoulement, la seconde endommagea la caméra et donc la bande. Elle fut irrécupérable. En 96 c'est un simple petite coulée qui fut enregistrée, mais malheureusement la luminosité ce jour-là fut si particulière que l'on ne distingue pas l'avalanche au milieu du manteau neigeux.

Un nouvel emplacement pour les cameras fut cherché et trouvé, en 1995, pendant mon travail de thèse. Cet emplacement est situé près du Col du Lautaret et, à 500 mètres en ligne droite du support des capteurs. Ce nouvel emplacement permet une vue globale de l'avalanche de façon qu'on puisse l'étudier et suivre l'avalanche depuis la zone de départ jusqu'à la zone d'arrêt. De plus à cette distance, on a

dans le champ de l'image quelques points fixes qu'on peut utiliser comme points de repère. On a l'obligation d'avoir des points fixes dans le champ de vision afin de permettre une restitution dans l'espace des images.

Concernant le matériel de prises de vues, Marco et ses collaborateurs ont opté pour une caméra vidéo à stockage sur bande. Ils l'ont choisie pour la facilité d'utilisation de ces appareils dans un environnement difficile mais également pour le fait que les images vidéo peuvent être facilement numérisées et traitées en utilisant l'informatique.

3.3 Résultats des méthodes spatiales.

Nous nous sommes penchés dans un premier temps sur les méthodes spatiales d'estimation de mouvement (paragraphe **2.3.1 Méthodes spatiales**). Peu convaincus, étant donné la nature de nos images, nous voulions cependant montrer par des résultats concrets que les hypothèses du flot optique ne sont pas vérifiées sur nos images.

Les calculs présentés dans cette mémoire ont été réalisés à l'aide du logiciel DxlImage de société DDS sur un ordinateur HP-9000 sauf les calculs correspondantes à l'intercorrélation d'images. Ceux-ci ont été réalisés à l'aide du logiciel C-IMA, aujourd'hui il existe une version plus récente du logiciel C-IMA appelée WIMA, sur un PC-AT développé par l'équipe du professeur Schon au Laboratoire de Traitement du Signal et d'Instrumentation à l'Université Jean Monnet de St.-Etienne.

3.3.1 Le flot optique.

Une méthode très classique en estimation de mouvement est le calcul du flot optique. L'hypothèse sur laquelle repose cette méthode est l'invariance de la luminosité du pixel qui se déplace.

Plusieurs algorithmes de relaxation permettent d'obtenir une solution (dx, dy) pour chaque pixel. Il est clair que dès le départ on sent le problème puisque une avalanche de neige (blanche) qui coule sur le manteau neigeux (blanc) donne des variations de luminosité beaucoup trop proches entre pixels immobiles et pixels en mouvement. Nous le vérifions dans les résultats qui suivent. Rappelons que la méthode est décrite dans le paragraphe **2.3.1 Méthodes spatiales**.

Ici, afin de vérifier le fonctionnement de l'algorithme du flot optique, nous avons travaillé sur une image classique (image 3-3) dans le domaine du traitement d'images. L'image 3-3 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 mouvements représentés par les vecteurs (nous montrons seulement

les vecteurs de norme significative) sont cohérents avec la réalité du mouvement du train et du calendrier.

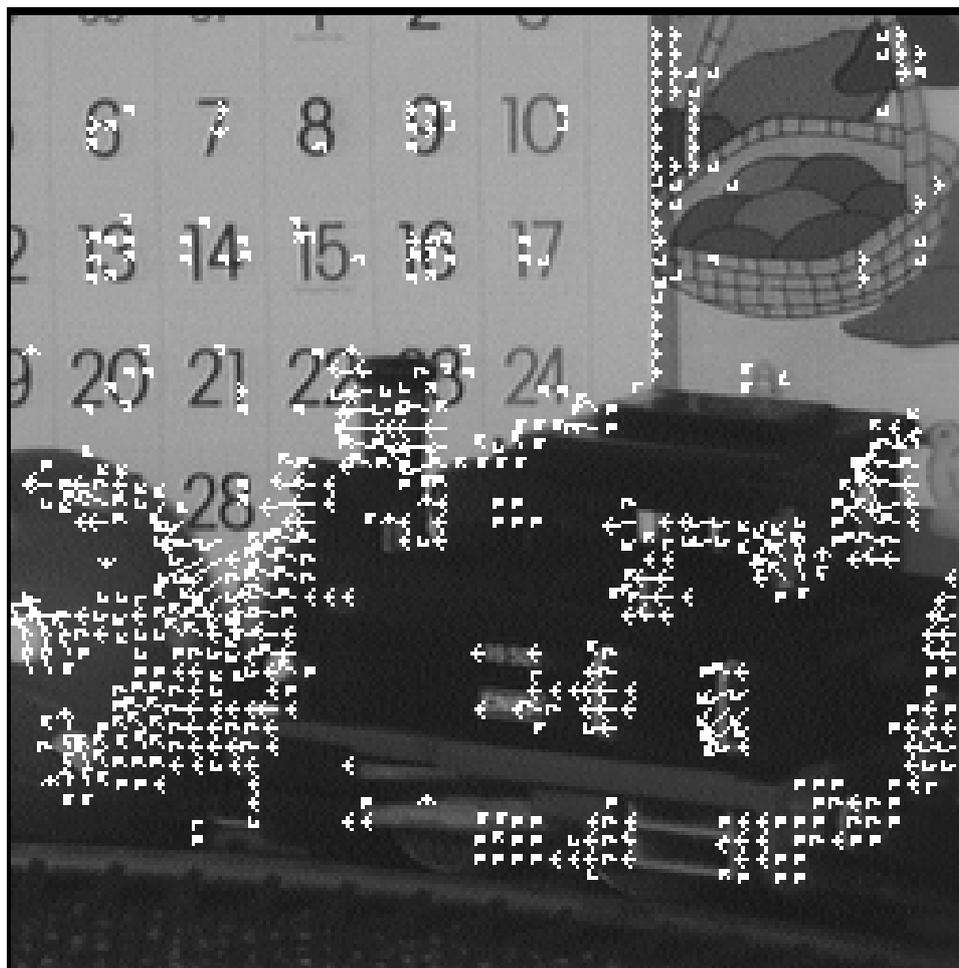


Image 3-3. L'image est composée d'un calendrier en mouvement vers le haut, d'un train en mouvement vers la gauche et la caméra en mouvement vers la droite. Les déplacements sont représentés par vecteurs.

Si nous appliquons maintenant le même algorithme à nos images, deux images consécutives d'une avalanche de neige, concrètement l'avalanche de Mars 1991, nous obtenons les résultats qui sont représentés sur l'image 3-4.



Image 3-4. Résultat de l'application de l'algorithme du flot optique sur une image de l'avalanche de Mars 1991.

L'image 3-4 représente une image de la séquence d'une avalanche de neige dense, et sur l'image nous avons représenté les vecteurs déplacement de norme significative. Afin d'extraire ces vecteurs nous avons utilisé deux images consécutives de la série d'images numérisées de l'avalanche de Mars 1991. Comme à résultat il faut atteindre un champ de vecteurs cohérent, c'est à dire, même sens et norme semblante sur la zone de l'avalanche et, absence des vecteurs en dehors de la zone avalancheuse. Le résultat obtenu n'est pas satisfaisant. D'une part, il y a les vecteurs qui représentent la direction correcte, quelques uns sont sur l'avalanche et les autres près de l'étrave. D'autre part, les vecteurs sont parsemés et la plupart ne représentent pas la direction qui leur correspondrait. La cause de ce problème pourrait être la présence excessive de bruit sur l'image et le principe même de cette méthode est en cause. En effet, dans notre cas tous les pixels ont une intensité trop proche les uns des autres, objet blanc (avalanche) sur fond blanc (couche de neige). Ce fait, rend difficile la détection des vecteurs déplacement étant donné que la déformation de l'objet en mouvement implique une variation de la luminosité et, donc, l'apparition de nombreux pixels en mouvement.

3.3.2 Conclusions des méthodes spatiales.

Ainsi la nature des images rend impossible l'application du flot optique, afin de réaliser une cartographie des vitesses à la surface d'une avalanche de neige dense. Les principaux coupables de l'incohérence du champ de vecteurs obtenu sont le faible contraste entre l'objet en mouvement et le fond, et, la nature même du phénomène (objet déformable en mouvement).

La qualité intrinsèque du VHS (vidéo à stockage sur bande) ou la numérisation peuvent être aussi responsables, étant donné que d'une image à la suivante, le niveau de gris moyen peut varier. Cela provoque des erreurs puisque le flot optique se base sur la conservation de la luminance.

Nous nous sommes donc par la suite tourné vers les méthodes fréquentielles dont le caractère global du traitement nous donnait plus d'espoir.

3.4 Résultats des méthodes fréquentielles.

Dans cette partie du chapitre nous allons vous présenter les résultats obtenus en utilisant les méthodes qui nous avons appelés fréquentielles (utilisent la transformée de Fourier). Les méthodes fréquentielles ont été développés au paragraphe **2.3.2 Méthodes fréquentielles**.

3.4.1 Spectre de phases.

Afin de vérifier la méthodologie nous avons développé distincts logiciels. Une série de tests a été réalisée sur différents types d'images. Le test a été réalisé à partir d'images de synthèse, une image réelle numérisée et déplacée artificiellement et des images numériques provenant d'un enregistrement vidéo d'une avalanche. Sur ces différents types d'images ont été appliqués nos logiciels.

Par la suite nous présentons les résultats obtenus. Nous travaillons sur des images noir et blanc avec 256 niveaux de gris (NG). Le 255 correspond au blanc et 0 au noir.

Images de synthèse.

La première image de synthèse que nous avons créée et travaillée correspond à une image carrée de 256 x 256 pixels, dans laquelle il y a un carré central blanc (NG = 255) de 22 x 22 pixels, le reste de l'image est noir (NG = 0) (image 3-5).

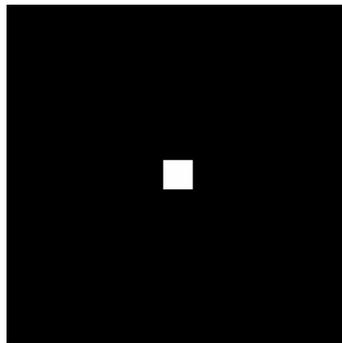


Image 3-5. Image d'un carré blanc de taille 22 x 22 pixels sur un fond noir. Taille totale de l'image 256 x 256 pixels.

Trois déplacements différents ont été appliqués à cette image (image 3-5). Les images déplacées ont été calculées à partir de l'image originale selon l'expression suivante :

$$I(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{p=0}^{N-1} I(x + p \cdot n, y - p \cdot m) \quad \text{Eq. 3-1}$$

$I(x, y)$ est le niveau de gris de la position (x, y) .

N est le numéro de pixels déplacés.

La position (x, y) a son origine, point $(0, 0)$, au coin gauche en haut de l'image.

n, m sont des valeurs entières qui nous permettent choisir un angle de déplacement.

Les angles sont comptés dans le sens antihoraire.

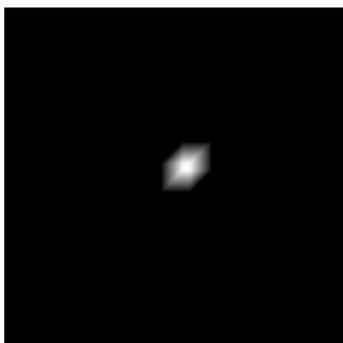


Image 3-6

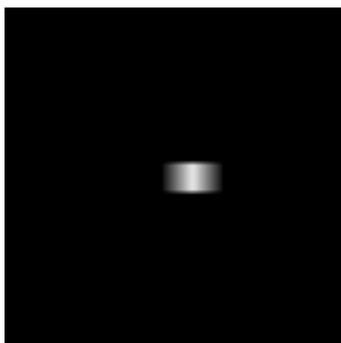


Image 3-7

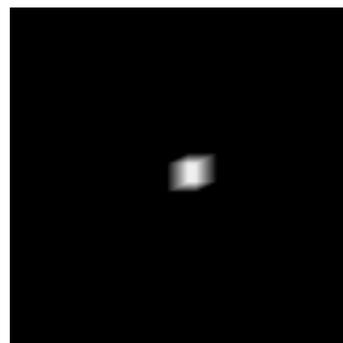


Image 3-8

Déplacement, de l'image original (image 3-5), de 17 pixels et un angle de 45 degrés (image 3-6), de 25 pixels et un angle de 0 degrés (image 3-7) et de 17 pixels et un angle de 26,56 degrés (image 3-8).

Par la suite, le logiciel **angleb** (voir annexe) a été appliqué à ces images pour nous permettre obtenir le spectre d'énergie et le spectre de phases et voir si, à partir de là, peuvent se déduire le déplacement et l'angle qui leur ont été appliqués.

Une fois l'algorithme appliqué, les images 3-9 et 3-10 montrent respectivement les spectres d'énergie et de phase de l'image 3-6, image avec un déplacement de 17 pixels et un angle de 45 degrés.

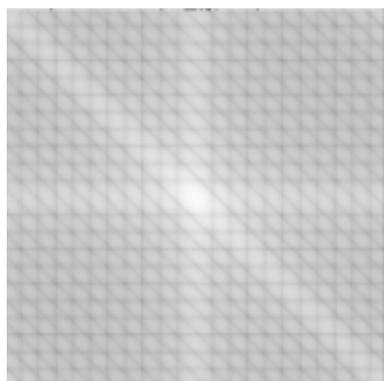


Image 3-9. Spectre d'énergie de l'image 3-6.

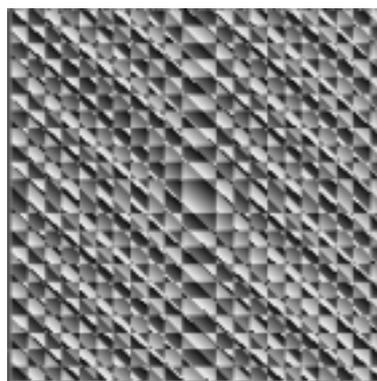


Image 3-10. Spectre de phase de l'image 3-6.

Les images 3-11 et 3-12 montrent respectivement les spectres d'énergie et de phase de l'image 3-7, image avec un déplacement de 25 pixels et un angle de 0 degrés.

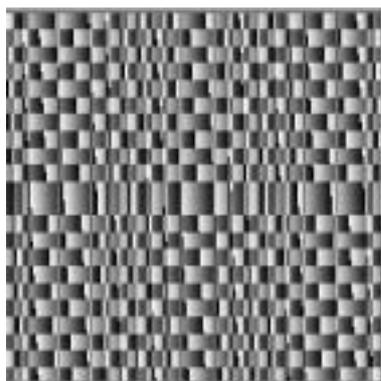
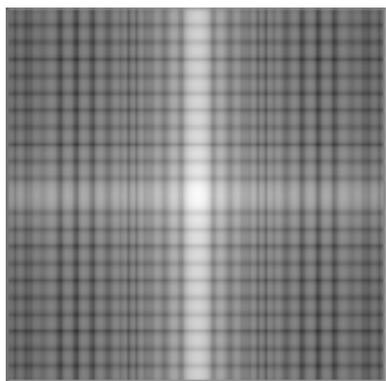


Image 3-11. Spectre d'énergie de l'image 3-7. Image 3-12. Spectre de phase de l'image 3-7.

Les images 3-13 et 3-14 montrent respectivement les spectres d'énergie et de phase de l'image 3-8, image avec un déplacement de 17 pixels et un angle de 26,56 degrés.

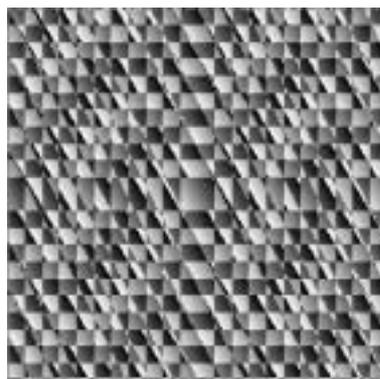
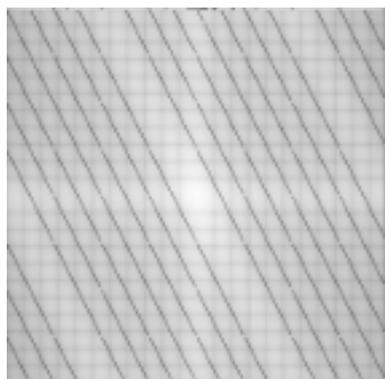


Image 3-13. Spectre d'énergie de l'image 3-8. Image 3-14. Spectre de phase de l'image 3-8.

Ces résultats permettent de montrer que l'analyse des phases fait apprécier, très clairement et visuellement, les différents déplacements et les angles. C'est-à-dire que les différences nous pouvons les détecter à l'oeil, sur les images résultats du spectre d'énergie et de phase. Par exemple, à travers des différents angles de la première image, le spectre de phases a des angles différents par rapport à l'horizontale. Les déplacements se traduisent dans le spectre de phases avec des lignes plus ou moins séparées.

Le problème se pose parce que, même si, visuellement, il est simple de détecter la différence des angles ou la différence des déplacements, le fait de quantifier à partir du spectre de phase quel est l'angle ou quel est le déplacement, n'est pas évident.

Image réelle numérisée

Voici maintenant le résultat sur une image réelle numérisée à 256 niveaux de gris (image 3-15), et déplacée artificiellement en utilisant l'équation 3-1:

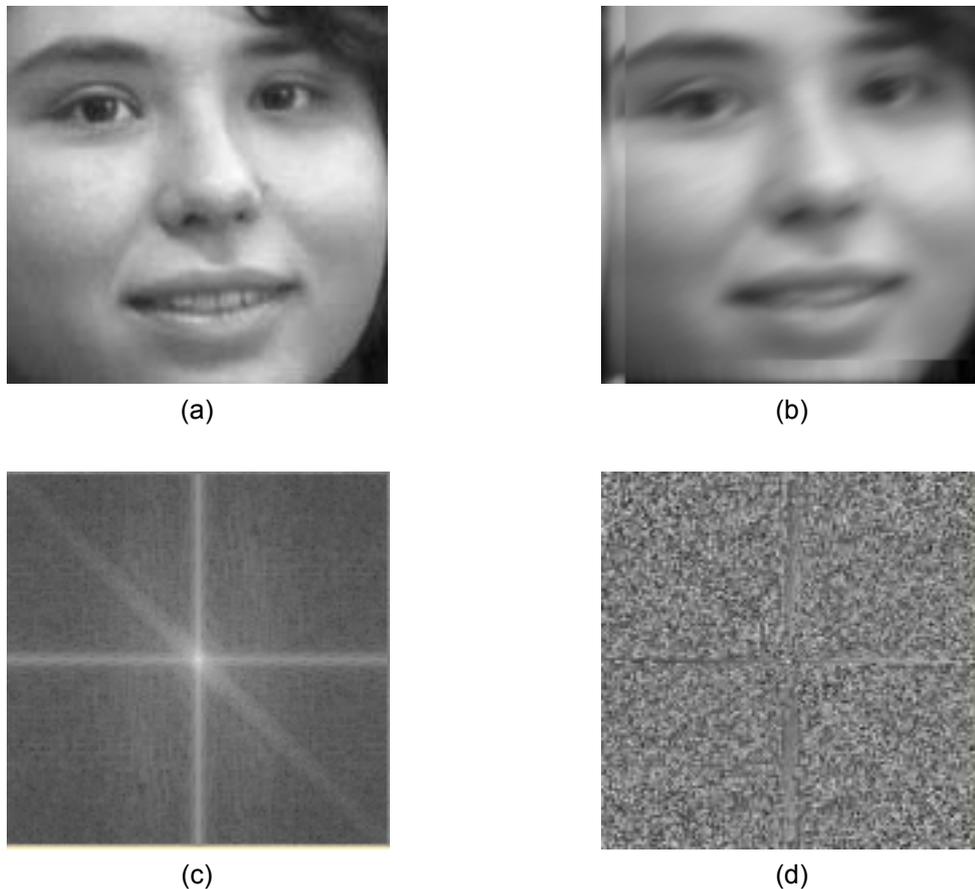


Image 3-15. Dans cette série on voit l'image originelle (a) de 256 x 256 pixels, puis l'image déplacée de 17 pixels et un angle de 45 degrés (b), et finalement le spectre d'énergie (c) et le spectre de phase (d).

Dans ce cas là, sur le spectre d'énergie (image 3-15c), l'angle d'inclinaison s'apprécie clairement, par contre, sur le spectre de phase (image 3-15d), l'angle d'inclinaison est aperçu très faiblement, et le déplacement est impossible à quantifier.

Image numérisée d'une avalanche

L'algorithme est appliqué, par la suite, sur trois images, non consécutives, numérisées (256 niveaux de gris) à partir d'un film vidéo d'une avalanche de neige dense. Sur l'image 3-16 a, b et c, on peut apprécier trois moments, numérisés, du film vidéo : la zone de l'écoulement avant l'arrivée de la coulée, un instant du corps de l'avalanche et la partie finale de l'avalanche. Dans ce cas les images ont été extraites d'un enregistrement vidéo d'une avalanche déclenchée artificiellement le 12 Mars 1991.

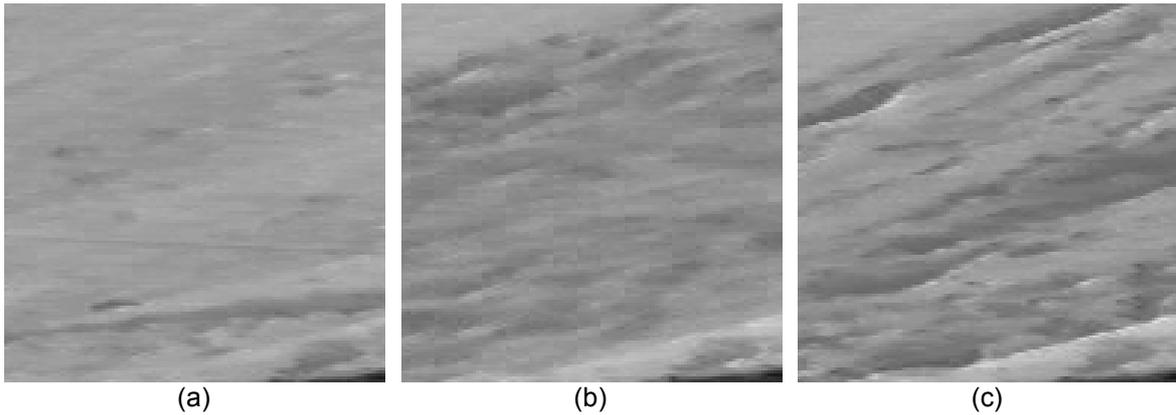


Image 3-16. On apprécie trois instants d'une avalanche de neige, l'avalanche se déplace de droite à gauche et de haut en bas: la première image montre la zone avant l'arrivée de l'avalanche (a); la deuxième est un instant du corps l'avalanche (b); et la troisième, la partie finale de l'avalanche (c). Toute ces images ont une taille de 128 x 128 pixels.

Les résultats obtenus en appliquant nôtre algorithmme, sur les images 3-16 a, b et c, **angleb** (voir annexe) qui nous donne le spectre d'énergie et le spectre de phase, sont présentés dans les images 3-17 (a et b), 3-18 (a et b) et 3-19 (a et b):

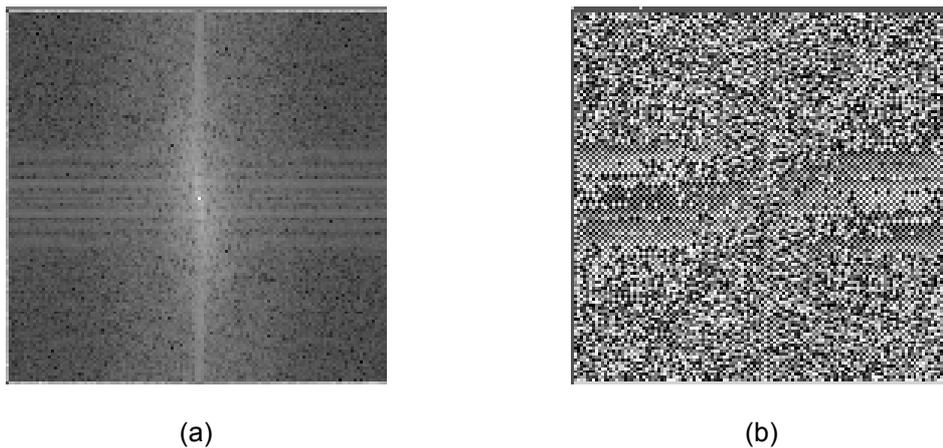


Image 3-17. Spectre d'énergie (a) et de phase (b) de l'image 3-16a.

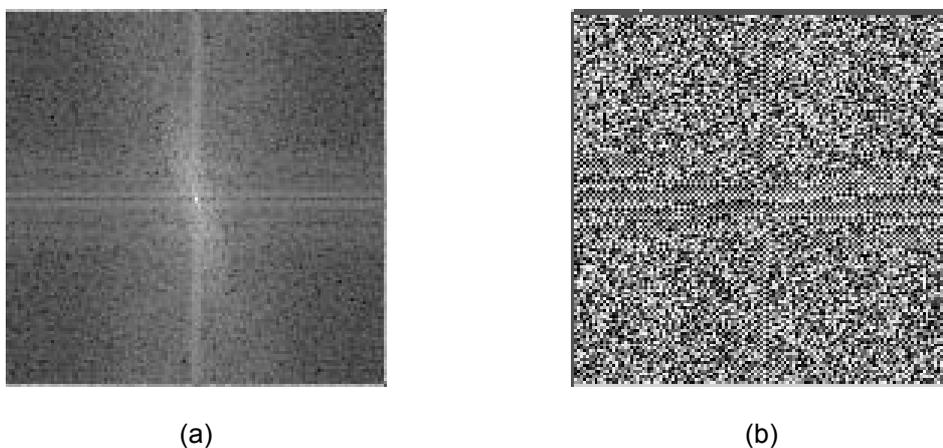


Image 3-18. Spectre d'énergie (a) et de phase (b) de l'image 3-16b.

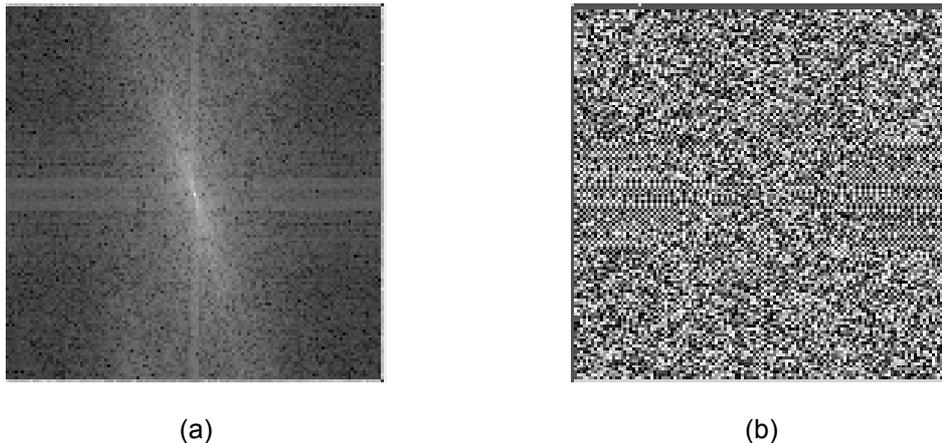


Image 3-19. Spectre d'énergie (a) et de phase (b) de l'image 3-16c.

Dans ce dernier cas, sur les spectres d'énergie (images 3-17a, 3-18a et 3-19a) on peut apprécier dans quelles images il y a un déplacement, et dans quelles il n'y en a pas. Sur les images 3-18a et 3-19a, qui correspondent au corps et à la queue de l'avalanche, on distingue une ligne blanche qui fait un angle d'à peu près 20 degrés dans le sens antihoraire par rapport à la ligne verticale, et qui croise au milieu de l'image. Cela est cohérent avec le fait que les images ont été prises depuis la même position avec la caméra vidéo fixe et l'avalanche en se déplaçant de droite à gauche et de haut en bas de la scène. Par contre, sur l'image 3-15a cet angle n'existe pas.

Le spectre de phase (images 3-17b, 3-18b et 3-19b) est très compliqué à interpréter, et encore plus à en extraire une quantification quelconque de vitesse.

Les images de départ, images 3-16 a, b et c, ne sont pas très contrastées. En effet, il est très difficile de distinguer l'objet en mouvement par rapport au fond. Cela complique l'utilisation du spectre de phases, et explique les résultats.

Ainsi d'après ces résultats, nous considérons que, pour l'évaluation du champ des vitesses en surface d'une avalanche de neige dense, la méthode du spectre de phases n'est pas utilisable car il est difficile à quantifier les résultats.

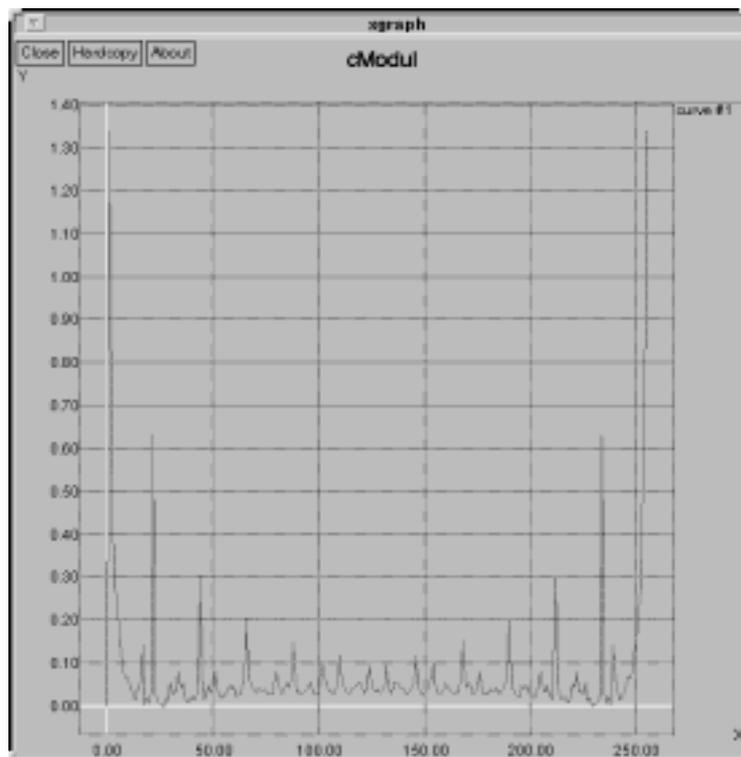
3.4.2 Cepstre.

Dans cette partie nous allons montrer les résultats obtenus en appliquant cette méthode sur différents types d'images. On peut voir la théorie au paragraphe **2.3.2 Méthodes fréquentielles: cepstre** correspondant au chapitre 2.

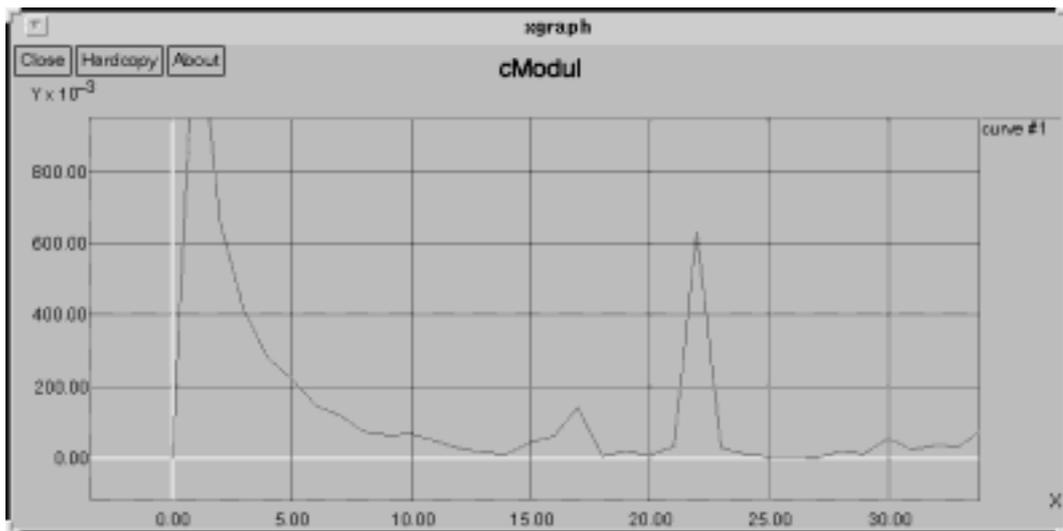
Nous avons travaillé sur les mêmes images que dans la partie précédente (**Méthodes fréquentielles: spectre de phases**) c'est à dire; l'image de synthèse du carré blanc 22x22 pixels sur un fond noir (image 3-5), l'image réelle numérisée et déplacé artificiellement (image 3-15a et 3-15b), et, les trois images numérisées à partir d'un film vidéo d'une avalanche de neige (images 3-16a, 3-16b et 3-16c).

Nous avons développé l'algorithme **cepstrum** (voir annexe) pour calculer le cepstre (Eq. 2-26). L'algorithme travaille de la façon suivante : nous prenons l'image et nous faisons 32 coupes horizontales tout au long de l'image. Ainsi, selon la taille des images à notre disposition (128x128 et 256x256 pixels), nous aurons des courbes de 256 ou 128 points. Après, nous éliminons la composante continue des courbes, et nous faisons le calcul de leur norme. Puis, nous prenons le logarithme népérien de ces normes et leur moyenne. Finalement, nous calculons l'inverse de la transformée de Fourier de la moyenne obtenue et nous obtiendrons, en théorie, en représentant le cepstre par rapport au déplacement, un pic très prononcé qui correspondra au déplacement réalisé au début.

Par la suite nous présentons les résultats obtenus. Nous avons travaillé d'abord l'image qui correspond au carré blanc de 22 x 22 pixels sur un fond noir (image 3-5). Cette image, comme nous avons déjà dit, a été déplacée de 17 pixels. En théorie nous devons obtenir un pic sur le point 17. Nous retrouvons un premier pic qui correspond à la composante continue et après un pic central et ses harmoniques (figure 3-1a). Si nous regardons l'amplification du premier pic (figure 3-1b) nous constatons que celui-ci tombe sur le point 17. Ainsi, nous retrouvons, dans ce cas là, le déplacement que nous avons fait subi à l'image. Le pic qu'on observe sur le point 22 correspond à la taille du carré utilisée pour faire le traitement.



(a)



(b)

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.

Si, par la suite, nous considérons l'image du visage féminin (image 3-15a) qui avait été déplacé de 25 pixels (image 3-15b), voici les résultats obtenus sur la figure 3-2:

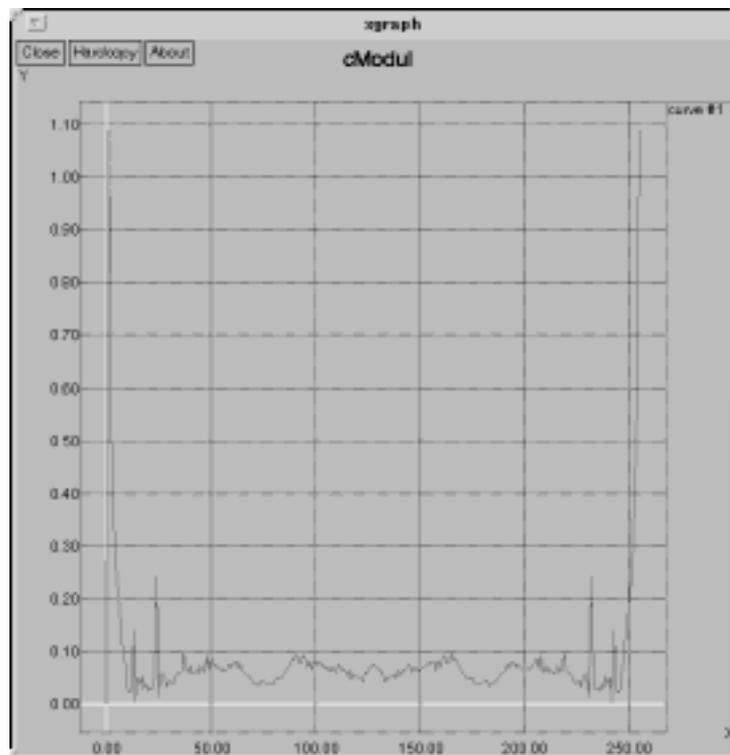


Figure 3-2a. Résultat de l'application du cepstre à l'image du visage féminin (image 3-15b).

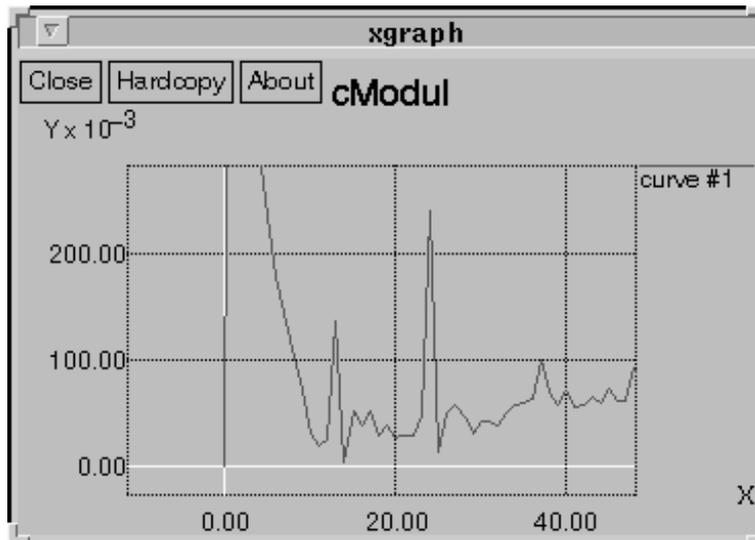


Figure 3-2b. Amplification de la figure 3-2a autour de la zone correspondant au pic (point 25).

Dans cette image, le pic se trouve au point prévu (25), c'est-à-dire que, le point nous donne le déplacement qu'on avait effectué sur cette image.

Le succès de ces résultats sur des images synthétiques idéales déplacées synthétiquement, pourrait nous mener à croire que c'est une méthode efficace pour retrouver les déplacements sur les images. On observe maintenant le résultat de l'application de cette méthode sur une image d'une avalanche, image correspondant au corps de l'avalanche (image 3-16b), enregistrée en vidéo, en Mars 1991, puis numérisée (figure 3-3 a et b).

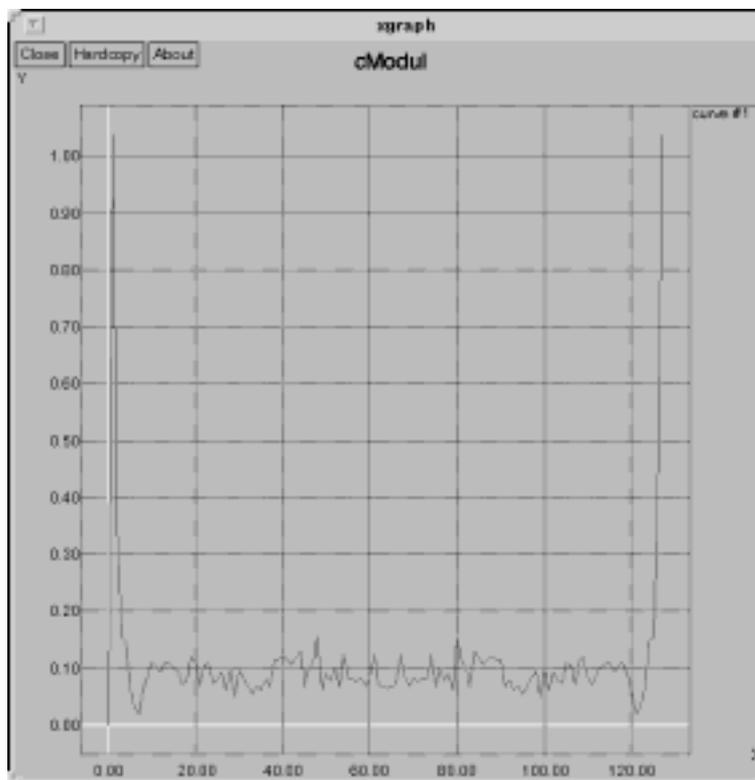


Figure 3-3a. Résultat de l'application du cepstre à une image qui correspond à l'avalanche du mois de Mars 1991 (image 3-16b).

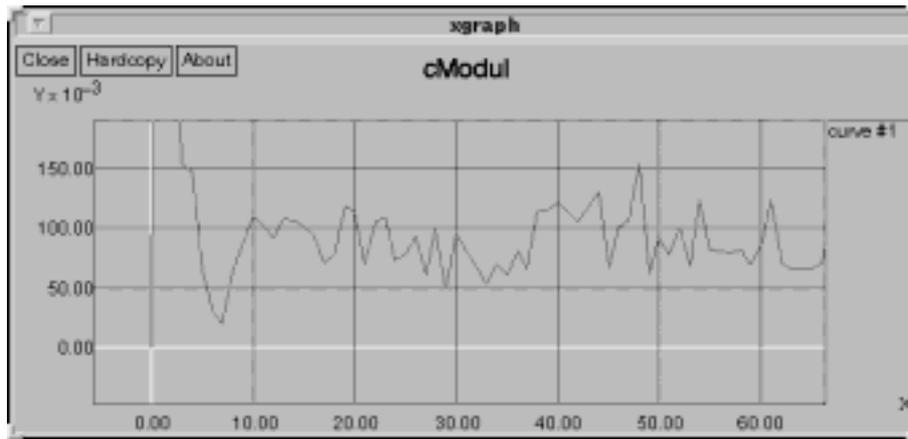


Figure 3-3b. Amplification de la figure 3-3 a.

La première remarque aux vues de ces résultats (figure 3-3 a et b) est qu'il n'existe pas de pics significatifs. En faisant une estimation sur l'écran avec deux images consécutives, le déplacement observé est d'environ 30 pixels à peu près. Ainsi, il faudrait trouver un pic dans ces premiers 30 pixels, mais il n'existe pas. Cela pourrait être dû à un déplacement insignifiant, dans la scène, qui s'est produit mais qui n'apparaît nulle part, ou parce que la résolution de la méthode du cepstre est manifestement insuffisante pour le traitement de ce type d'images. Etant donné que, sur des images synthétiques, la méthode retrouve les déplacements d'environ 1 à 2 dizaines de pixels avec une certaine clarté, manifesté par des pics, cela nous fait penser que la méthode du cepstre reste insuffisante pour le genre d'images que l'on veut traiter.

3.4.3 Intercorrélation d'images.

Nous présentons maintenant les résultats obtenus à partir de l'application de la méthode de traitement développée au paragraphe **2.3.2 Méthodes fréquentielles: intercorrélation d'images**.

L'avalanche que nous présentons, analysée par Marco (1994), a été déclenchée artificiellement le 15 Janvier 1992. Une image de cette avalanche est présentée sur l'image 4-19.

Une première estimation de la vitesse a été obtenue, par Marco (1994), en pointant des boules de grand diamètre d'une image à la suivante. Mais le nombre de ces boules étant trop faible pour permettre un traitement automatisé, cette méthode fut donc utilisée manuellement et ponctuellement pour vérifier la précision des résultats obtenus avec la méthode d'intercorrélation d'images. Les boules provoquent des zones d'ombre et donc des changements d'intensité lumineuse très nets et ponctuels; la mesure du déplacement de ces zones d'ombre permet une première analyse de la vitesse. La fiabilité de cette méthode repose sur la faible variation de forme de cette zone d'ombre d'une image à une autre. L'information retenue est contenue dans l'intensité lumineuse de chaque pixel. Nous avons travaillé sur des images en noir et blanc (256 niveaux de gris).

La numérisation des informations analogiques présentes sur une image est réalisée à l'aide d'une carte type Matrox (PIP 1024B). Après numérisation, l'image en noir et blanc obtenue est formée de 512 x 512 pixels, chacun étant affecté d'une valeur comprise entre 0 et 255 correspondant à son niveau de gris (le noir correspond à 0 et le blanc à 255). Le logiciel C-IMA permet alors de définir une fenêtre rectangulaire délimitant une petite surface de l'image étudiée. Il utilise ensuite les méthodes d'intercorrélation pour comparer l'information contenue dans cette fenêtre à celle présente dans la même fenêtre mais placée sur une image différente. Le logiciel envisage alors tous les déplacements possibles de la première image et évalue, dans chaque cas, la corrélation existant entre les pixels des deux fenêtres en se basant sur le niveau de gris. Le logiciel présente alors les résultats sous la forme d'un corrélogramme bidimensionnel et indique le déplacement pour lequel cette intercorrélation est la meilleure.

Le logiciel affecte d'une manière linéaire un niveau de gris à chaque couple (a,b) selon la valeur de l'intercorrélation correspondant à ce point, en donnant une valeur nulle (noir) au couple pour lequel la fonction d'intercorrélation est minimale et une valeur égale à 255 (blanc) au couple pour lequel cette fonction est maximale. On obtient alors le corrélogramme de l'image 3-20a.

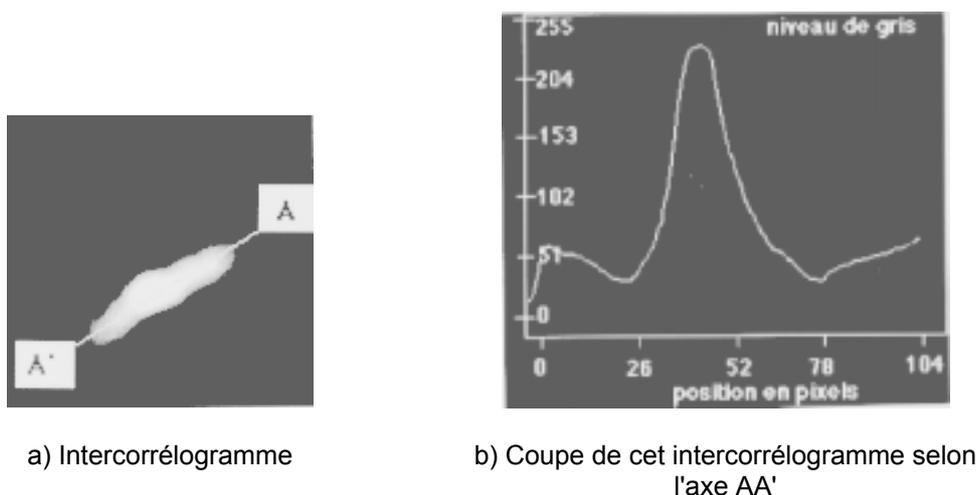


Image 3-20. Copie d'écran d'un corrélogramme obtenu entre deux images en utilisant le logiciel C-IMA.

La distance de déplacement, en pixels (image 3-20b), est obtenue en calculant la distance entre le centre du corrélogramme et le pixel correspondant à la valeur maximale de la fonction d'intercorrélation.

Nous pouvons situer visuellement ce point qui est au centre de la zone la plus claire de l'intercorrélogramme (image 3-20a).

La dimension de l'écoulement n'a pas permis d'analyser la vitesse en plusieurs points. Les résultats présentés dans la figure 3-4 correspondent à la vitesse au milieu de la surface de l'écoulement sur une série de 250 images.

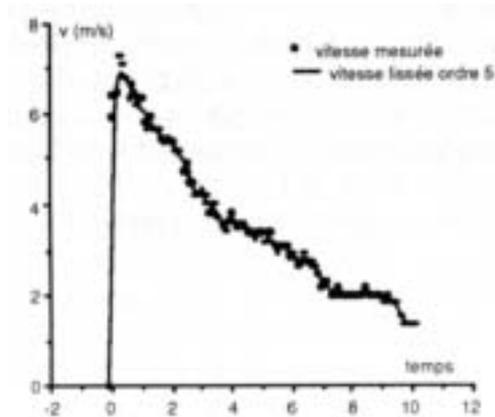


Figure 3-4. Vitesse au milieu de la surface de l'avalanche du 15 Janvier 1992. Vitesse mesurée et vitesse lissée d'ordre 5. Axe x temps en secondes et axe y vitesse en m/s. (Marco, 1994).

L'intérêt de ce profil est qu'il permet de retrouver le profil théorique d'une avalanche en phase d'arrêt (Gubler, 1987). Selon cet auteur, une avalanche dense est caractérisée par un front, un corps, qui a une vitesse identique à celle du front, et enfin une queue dont la vitesse décroît pratiquement linéairement. Une avalanche dense peut s'arrêter sur une pente, seulement à partir du moment où le corps de l'écoulement disparaît. Pendant cette phase d'arrêt, l'avalanche n'est composée que d'un front et d'une queue. Les mesures traduisent très bien cette interprétation physique sachant que la coulée s'est arrêtée seulement 15 mètres à l'aval de notre point de mesure.

L'estimation des erreurs de mesure est très délicate. Les résultats obtenus sont du bon ordre de grandeur. En effet, les vérifications réalisées manuellement à l'écran (suivi d'une boule particulière entre deux points particuliers de l'image) concordent avec les valeurs des observations à 1,5 m/s près. Cela représente un 20% de différence pour les vitesses autour de 7.5 m/s.

La précision obtenue reste tout à fait insuffisante pour la réalisation d'une cartographie de la vitesse. Cette imprécision est due essentiellement à une erreur d'estimation du maximum du corrélogramme (image 3-20a). Son application à des images présentant un "flou de bougé", dû à des vitesses importantes de l'écoulement, s'est révélée impossible.

Nous avons donc été amenés à utiliser une méthode adaptative, présentée dans le chapitre 4, permettant l'élimination des informations relatives à des phénomènes autres que le simple déplacement.

3.4.4 Conclusion des méthodes fréquentielles.

Après avoir présenté les résultats obtenus en utilisant les méthodes fréquentielles, nous remarquons que le caractère global de celles-ci nous donne un meilleur résultat qu'en utilisant les méthodes spatiales.

De toute façon, les méthodes fréquentielles exposées nous donnent des résultats insuffisants face à nos objectifs d'atteindre une carte de vitesses en surface d'une avalanche. Nous avons eu des difficultés bien soit de quantification des résultats bien soit pour obtenir des résultats qui recouvrent tout la zone de l'écoulement.

Nous essayerons, donc, de trouver une méthode qui nous permette de réaliser cette carte de vitesses et, pour ce but, nous proposons la méthode adaptative développée par la suite (chapitre 4). Cette méthode est née à partir de la tentative d'améliorer les résultats obtenus en utilisant la méthode de corrélation d'images qui est la méthode qui nous a donné les résultats les plus satisfaisants.

4 Estimation de la vitesse en surface d'une avalanche dense. La méthode adaptative.

Nous présentons maintenant la méthode que nous avons appelée méthode adaptative. Nous pouvons considérer qu'il s'agit de la méthode la plus adéquate que nous ayons trouvée pour calculer les vitesses en surface d'une avalanche de neige dense. Ce calcul est un de nos objectifs cités en début de ce mémoire de thèse.

4.1 Introduction.

J'insisterai encore une fois, sur la difficulté de travailler avec des avalanches de neige, non seulement à cause du danger inhérent dont nous sommes tous pleinement conscients, mais aussi à cause de la grande difficulté d'obtenir des données expérimentales, les enregistrements d'avalanches. Les empêchements sont dues aux conditions particulières nécessaires pour obtenir des résultats corrects. Les résultats corrects seulement peuvent être obtenus à partir des conditions optimales de la neige pour chacune des manipulations et des conditions météorologiques favorables qui permettent un bon éclairage pour pouvoir enregistrer.

La mise en place de tous les moyens humains et techniques nécessaires pour pouvoir développer correctement l'expérience est également un obstacle important. Pendant trois hivers où nous avons tenté d'obtenir des données, cela n'a pas été possible. Durant les hivers de 1994, 1995 et 1996 on a déclenché trois avalanches au Col du Lautaret (Hautes Alpes), une à la Vallée de la Sionne (Vallée, Suisse), et deux à Boï-Taüll (Pyrénées, Catalogne).

Des trois avalanches déclenchées au Col du Lautaret entre 1995 et 1996, deux ont été déclenchées l'année 95 et une l'année 96. Des deux avalanches de l'hiver 95, la première, en Janvier 95, fut une avalanche de neige poudreuse, qu'on utilisera plus tard pour le calcul des contours, la seconde, en Mars 95, n'est pas utilisable parce qu'elle fut responsable de la destruction de la caméra vidéo chargée de son enregistrement. Le mois d'Avril 96, une petite coulée de neige bruitée à peine visible dans le champ de la caméra vidéo, fut enregistrée. Cette dernière avalanche n'est pas exploitable parce qu'on peut à peine la distinguer du fond.

Les deux avalanches enregistrées à Boí-Taüll par mes collègues de l'Université de Barcelone (UB) l'année 95, étaient des avalanches de neige poudreuse ou un mélange poudreuse-dense. Mais dans les deux cas, la partie poudreuse ne permet pas de visualiser la partie dense de l'avalanche. Une de ces deux avalanches sera utilisée pour faire une comparaison entre la sismique et les modèles, nous en parlerons plus tard, chapitre 6, dans ce mémoire de thèse.

L'avalanche enregistrée à la Vallée de la Sionne l'année 96 est une avalanche de neige poudreuse on l'utilisera dans le chapitre 5 de la thèse.

Finalement il faut dire que les films vidéo utilisés dans ce chapitre ont été enregistrés par la division nivologie du Cemagref en Mars 91, Janvier 92 et Avril 92 au site expérimental du Col du Lautaret (Hautes Alpes).

Les films vidéo ont été pris par un caméscope CCD-V5000E (vidéo Hi8 PRO) de SONY utilisant le standard PAL. La numérisation des images a été effectuée par une carte Media Magic.

4.2 Analyse du problème.

La technique que nous développons utilise le fait que chaque image vidéo est constituée par deux trames, trame paire et trame impaire, acquises à des instants séparés de 1/50 s. Ceci nous permet de doubler la résolution temporelle de notre échantillonnage, nous permet passer de 25 images par seconde à 50 images par seconde.

D'autre part le «flou de bougé», dû au temps de pose, produit dans toute méthode d'intercorrélation une contribution importante dans le pic central. Ceci a pour effet de masquer le pic d'intercorrélation dû au déplacement. Pour remédier à cet inconvénient, nous avons simplement travaillé par soustraction de trames. Si l'on soustrait la trame paire et la trame impaire d'une même image, nous obtenons une image dont les niveaux de gris caractérisent les zones de la surface qui ont subi un déplacement. En blanc (niveau de gris 255) zones qui ont subi un déplacement et, en noir (niveau de gris 0) zones non déplacées.

Nous n'avons ainsi retenu dans chaque image que les informations relatives aux déplacements (image 4-1). Il faut alors estimer la translation qui fait passer de la différence d'une image à la différence de l'image suivante. Nous utilisons pour cette estimation un filtre adaptatif de Wiener, déjà largement décrit dans de nombreux articles (Gonzalez et Wintz, 1982; Biemond et al, 1988; Biemond et al, 1990; Nuñez et Llacer, 1993; Ward, 1993).

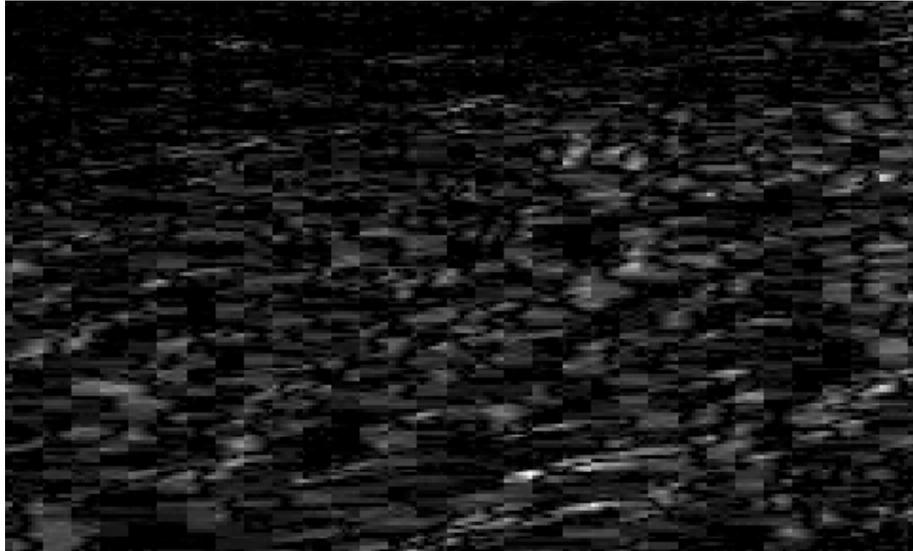


Image 4-1. Soustraction de deux trames d'une même image. En blanc (niveau de gris 255) zones qui ont subi un déplacement et, en noir (niveau de gris 0) zones non déplacées.

4.2.1 Modélisation.

L'analyse détaillée de nos images montre que la dégradation peut être représentée, selon Kunt (1986), par le modèle d'un système linéaire invariante par translation. Ainsi, l'image dégradée $y(k, l)$ est représentée par:

$$y(k, l) = \sum_{k'=-\infty}^{+\infty} \sum_{l'=-\infty}^{+\infty} h(k', l') x(k - k', l - l') + b(k, l) \quad \text{Eq. 4-1}$$

où $x(k, l)$ est l'image idéale, $h(k, l)$ est la réponse impulsionnelle de la dégradation, fonction de transfert, et $b(k, l)$ est un bruit additif caractéristique du système de dégradation.

Le problème de restauration d'images est la suivante: étant donné l'image dégradée $y(k, l)$ comment obtenir l'image idéale $x(k, l)$. La fonction de transfert, $h(k, l)$, peut être déterminée, soit à partir du phénomène physique qui a provoqué la dégradation, soit à partir de l'image dégradée. Dans notre cas, nous considérons que la dégradation a été provoquée par un déplacement linéaire de l'objet pendant le temps de pose.

Restauration par filtrage inverse

Considérons d'abord le modèle convolutif (équation 4-1), sans bruit additif, c'est-à-dire avec $b(k, l)=0$. Dans ce cas, la transformation de Fourier bidimensionnelle discrète conduit à:

$$Y(m, n) = H(m, n) \cdot X(m, n) \quad \text{Eq. 4-2}$$

Connaissant $y(k, l)$ et $x(k, l)$, on peut calculer $Y(m, n)$ et $X(m, n)$ à l'aide de la Transformée de Fourier. D'où:

$$H(m, n) = \frac{Y(m, n)}{X(m, n)} \quad \text{Eq. 4-3}$$

C'est la problème classique de la déconvolution par filtrage inverse. La transformée inverse de l'équation 4-3 donne le résultat recherché, la fonction de transfert $h(k, l)$.

Toutefois, un certain nombre de problèmes apparaissent dans l'utilisation de la relation 4-3. Dans le domaine fréquentiel, $X(m, n)$ peut être nulle. Il se peut également que, pour les mêmes valeurs de m et de n , $Y(m, n)$ et $X(m, n)$ soient nulles simultanément, conduisant ainsi à une indétermination. On ne peut obtenir la fonction de transfert, $h(k, l)$, que d'une manière approchée, en utilisant des astuces pour éviter les discontinuités et les indéterminations.

En présence du bruit, la transformation de Fourier conduit à:

$$H(m, n) = \frac{Y(m, n) - B(m, n)}{X(m, n)} \quad \text{Eq. 4-4}$$

Pour des faibles valeurs de $X(m, n)$, le rapport $B(m, n)/X(m, n)$ peut être grand et peut influencer d'une manière non négligeable la transformée $H(m, n)$.

Le filtrage inverse conduit à un certain nombre de problèmes pratiques, surmontés par des astuces plus ou moins arbitraires.

Restauration par les moindres carrées

Une autre manière de résoudre le problème de la restauration consiste à chercher une estimation $h'(k, l)$ de la fonction de transfert $h(k, l)$, de façon à minimiser une mesure de différence. Une mesure qui est très pratique mathématiquement, mais insatisfaisante pour le jugement subjectif de l'oeil, est l'erreur quadratique moyenne. Le filtre qui minimise l'erreur quadratique moyenne

$$\varepsilon^2 = E[(h(k, l) - h'(k, l))^2] = \sqrt{\frac{\sum_{k,l} (h(k, l) - h'(k, l))^2}{N}} \quad \text{Eq. 4-5}$$

au sens statistique, est appelé le filtre de Wiener (Van Trees, 1968). La méthode de restauration utilisant le filtre de Wiener est appelée la restauration par les moindres carrées.

La réponse fréquentielle du filtre de Wiener ne sera pas établie ici. Une description détaillée peut être trouvée dans Van Trees (1968). Cette réponse est de la forme suivante:

$$H(m, n) = \frac{Y^*(m, n) \phi_X(m, n)}{|X(m, n)|^2 \phi_X(m, n) + \phi_B(m, n)} \quad \text{Eq. 4-6}$$

où $\phi_x(m,n)$ et $\phi_B(m,n)$ sont respectivement les densités spectrales de puissance de l'image idéale et du bruit. L'équation 4-6 est établie avec l'hypothèse de l'indépendance statistique du bruit et de l'image idéale. On remarque qu'en l'absence du bruit ($\phi_B(m,n) = 0$), le filtre de Wiener s'identifie au filtre inverse.

Les connaissances a priori requises pour cette méthode sont celles de l'image idéale et des densités spectrales de puissance (ou, d'une manière équivalente, des fonctions d'autocorrélation) du bruit et de l'image idéale.

De toute façon, nous ne travaillons pas sur l'image entière, mais seulement sur des sous-fenêtres. Ainsi considérant k sous-fenêtres pour chaque image, nous pouvons écrire la fonction de transfert de chaque sous-fenêtre comme :

$$H_k(m,n) = \frac{Y_k^*(m,n) \phi_{X_k}(m,n)}{|X_k(m,n)|^2 \phi_{X_k}(m,n) + \phi_B(m,n)} \quad \text{Eq. 4-7}$$

Si l'on fait la moyenne :

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N H_k \quad \text{Eq. 4-8}$$

Ainsi nous arriverons à réduire l'écart type sur l'estimation de H .

Si nous considérons le déplacement (k, l) pendant le temps de pose comme une translation pure, nous pouvons écrire la fonction de transfert dans l'espace de Fourier, selon les équations 2-17 et 2-18, comme :

$$H(m,n) = e^{-2i\pi(mk+nl)} \quad \text{Eq. 4-9}$$

Ainsi en effectuant la transformée de Fourier inverse de la fonction de transfert nous obtenons :

$$h(k,l) = \delta(k - a_k) \delta(l - a_l) \quad \text{Eq. 4-10}$$

Le résultat est une image qui présente un pic très prononcé qui nous signale le déplacement subi par la scène d'une image à l'image suivante.

4.2.2 Algorithme de la méthode adaptative.

Le traitement numérique a été réalisé à l'aide du logiciel DxImage de société DDS sur un ordinateur HP 9000. Le synoptique de la méthode de traitement est indiqué dans la figure 4-1.

Les différentes étapes du calcul sont les suivantes :

- (1) - On utilise deux images consécutives, image N et l'image N+1, de 768 x 480 pixels (standard PAL).
- (2) - On extrait les deux trames, la trame pair et la trame impaire, de chacune des images.
- (3) - On travaille dans une région définie par un rectangle ($k \times l$). Zone de la scène à étudier.
- (4) - On travaille sur les différences:
 - a) Trame Paire - Trame Impaire de l'image N et Trame Paire - Trame Impaire de l'image N+1. La différence de temps entre les images résultants est de 1/25 s.
 - b) Trame Paire de l'image N - Trame Paire de l'image N+1 et Trame Impaire de l'image N - Trame Impaire de l'image N+1. La différence de temps entre les images résultants est de 1/50 s.

Afin de simplifier la synoptique de la méthode de traitement nous décrivons seulement la partie correspondante à la procédure a). Pour la procédure b) nous appliquerons ce même traitement.

Le déplacement entre ces deux images est un vecteur (a_k, a_l) .

- (5) - On extrait de chaque différence n sous-fenêtres ($p \times p$) décalées de m pixels dans chacune des deux directions.
- (6) - On réalise les n estimations des fonctions de transfert $h(x,y)$ sur chaque différence.
- (7) - On détermine la position du maximum qui fournit le déplacement moyen dans la région étudiée sur chacune des moyennes. Exemple dans l'image 4-2.
- (8) - On recherche dans chacune des n fonctions $h(x,y)$ un maximum significatif au voisinage du déplacement moyen. On obtient ainsi une estimation du déplacement.

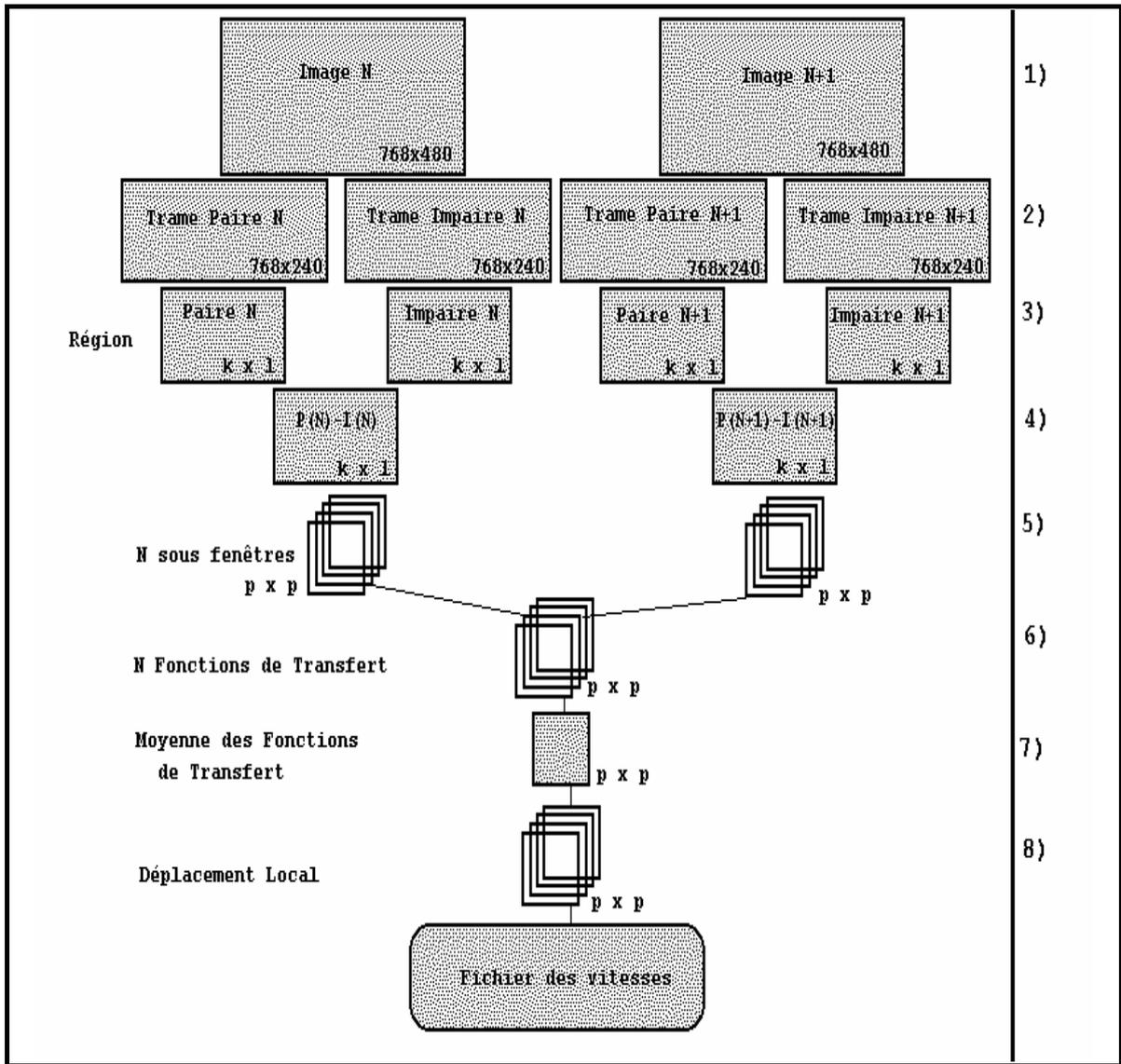


Figure 4-1. Synoptique de la méthode de traitement.



Image 4-2. Moyenne des Fonctions de Transfert (étape 7) à partir de la procédure a).

4.2.3 Robustesse et limites de la méthode.

Pour vérifier la robustesse et les limites de notre algorithme, nous avons créé des images test. Celles-ci, sont des rectangles 768 x 240 pixels, de même que la largeur des images détramées qui contiennent des valeurs de 0 à 255 générés au hasard à partir du logiciel DxlImage (image 4-3).



Image 4-3. Image générée au hasard à partir du logiciel DxlImage.

Lorsqu'on obtient cette image (image 4-3), nous générons une série de 7 images, qui correspond au possibles déplacements (tableau 4-1). Nous les obtenons en déplaçant la première image d'un certain numéro de pixels. Après, nous appliquons l'algorithme et nous observons les résultats.

Sur le tableau 4-1, nous avons une relation des déplacements que l'on a provoqué sur l'image, et les positions attendues des maximums après l'application de l'algorithme. Nous rappelons que, dans ce cas là, la taille des sous-fenêtres est de 128 x 128 pixels (figure 4-1; étape 5). Le point (0,0) se trouve sur le coin gauche en haut. Les x sont croissants vers la droite, et les y vers le bas. On considère toujours les déplacements entre la première et la deuxième image, la première et la troisième, etc.

Déplacement entre les images	Déplacement (x,y) (pixels)	Position attendue du maximum
1 et 2	(0,0)	(65,65)
1 et 3	(17,7)	(82,72)
1 et 4	(7,12)	(72,77)
1 et 5	(2,1)	(67,66)
1 et 6	(1,10)	(66,75)
1 et 7	(5,5)	(70,70)

Tableau 4-1. Relation des déplacements que nous avons provoqué sur l'image test.

Nous voulons vérifier si la position du maximum, après avoir appliqué l'algorithme, correspond à notre prévision théorique.

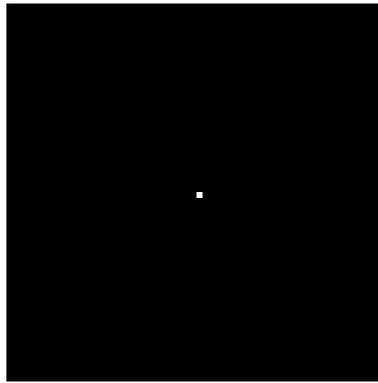


Image 4-4. Déplacement entre les images 1 et 2.

Sur l'image 4-4 on retrouve le maximum sur la position attendue, le centre de l'image point (65,65), étant donné que le déplacement dans ce cas là était de (0,0).

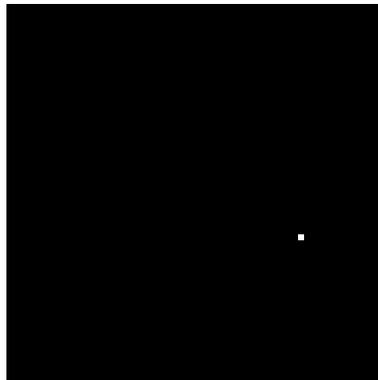


Image 4-5. Déplacement entre les images 1 et 3

Dans ce cas là, image 4-5, le déplacement effectué était de 17 pixels en x (direction horizontale) et 7 en y (direction verticale). Nous retrouvons le pic où l'on prévoyait. Sur le point (82,72).

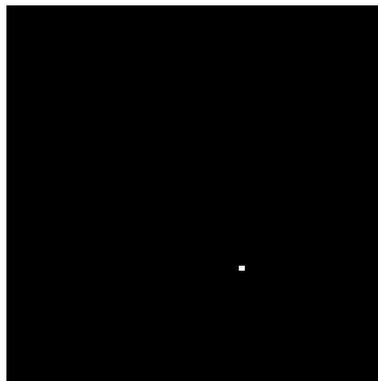


Image 4-6. Déplacement entre les images 1 et 4

Sur l'image 4-6, nous retrouvons le déplacement prévu de 7 pixels en x et 12 en y. Le maximum est sur le point (72,77).

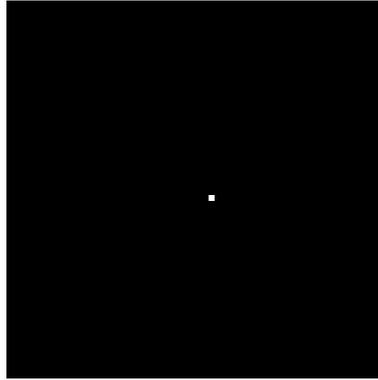


Image 4-7. Image déplacement entre les images 1 et 5

Dans cette image (image 4-7) nous pouvons apprécier que pour des petits déplacements, 2 pixels en x et un pixel en y, le logiciel est capable de retrouver le pic correctement. Maximum sur le point (67,66).

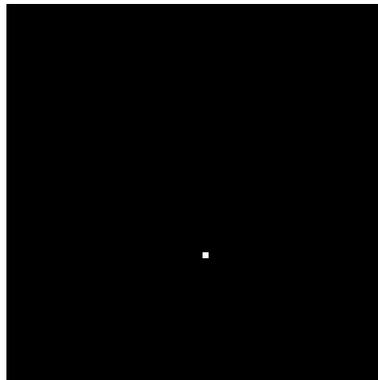


Image 4-8. Déplacement entre les images 1 et 6.

Dans cette image (image 4-8), nous remarquons qu'un fort déplacement en y (10 pixels) et un faible en x (1 pixel) a été aussi aperçu. Maximum sur le point (66,75).

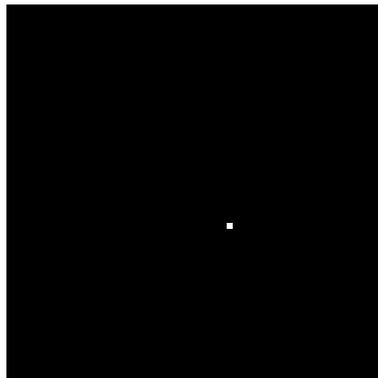


Image 4-9. Déplacement entre les images 1 et 7. Taille de l'image 64 x 64 pixels.

Finalement, dans cette dernière image (image 4-9) nous voyons représenté un déplacement identique dans les sens x et y (5 pixels).

En conséquence, nous observons que notre algorithme marche correctement pour les images test avec des valeurs générés au hasard.

Un autre moyen de tester cette méthode consiste à couper un carré de 128 x 128 pixels d'une image réel d'une avalanche. L'avalanche du mois d'Avril 1992. Nous avons déterminé cette largeur parce c'est celle des sous-fenêtres utilisées pour le calcul des vitesses. Nous prenons une image de l'avalanche d'Avril 1992, et nous lui appliquons le script *test_methode*. Ce script compare une image avec elle-même en la décalant suivant la diagonale de 6 pixels en x et 6 pixels en y jusqu'au delà de ses limites. Nous avons fait ce décalage dans le même sens de l'image, c'est à dire, de gauche à droite du scénario. Nous cherchons s'il est possible d'arriver à discriminer, d'une façon automatique, s'il y a eu de déplacement ou pas. On considère qu'il y a eu déplacement, si la moyenne des niveaux de gris de la zone où a priori nous attendons le mouvement, est supérieure à la moyenne générale de l'image.

Ainsi, il nous faut développer un système qui nous permet de réaliser, d'une façon efficace cela. Maintenant, il faut se placer dans l'algorithme (figure 4-1; étape 6) au moment où on doit décider s'il y a eu déplacement ou pas. Le résultat est une image qui représente la somme d'une des fonctions de transfert. À partir de là, il faut décider s'il y a eu mouvement ou pas. Pour cela, nous avons essayé trois méthodologies

Méthode 1: nous multiplions l'image par elle-même et après par 1000, pour augmenter le rang des valeurs entières (afin d'agrandir la résolution).

Méthode 2: nous multiplions l'image par elle-même et après on fait un cadrage de 0 à 1000.

Méthode 3: nous faisons un cadrage entre 0 et 255.

Nous présentons (tableau 4-2) les résultats obtenus après l'application des trois méthodes de seuillage. Où:

Image, correspond au numéro de l'image dans la série. Nous rappelons que nous ferons la comparaison entre la première image et les autres, en commençant par elle-même.

D. Réel, déplacement réel par rapport à la première image.

P.T.M., position théorique du maximum qui correspond au déplacement. Il s'agit de la position de l'extrémité du vecteur déplacement.

D. Moye, différence entre la moyenne de la sous-fenêtre où le mouvement est attendu et la moyenne globale de l'image. Voici le point clef, c'est ici qu'il faut établir un système qui nous permet de connaître s'il y a eu du mouvement à partir de cette différence.

P.C.M., position (en pixels) du maximum à partir de l'algorithme. C'est l'extrémité du vecteur déplacement.

Rappelons que le point (0,0) des images est toujours sur le coin gauche supérieur, les x sont croissants vers la droite, et les y vers le bas.

Image	D.Réel	P.T.M	Méthode 1		Méthode 2		Méthode 3	
			D. Moye-	P.C.M	D. Moye-	P.C.M	D. Moye-	P.C.M
1	(0,0)	(65,65)	-449	(65,65)	-613	(65,65)	-186	(65,65)
2	(-6,6)	(59,71)	1024	(59,71)	1918	(59,71)	974	(59,71)
3	(-12,12)	(53,77)	895	(53,77)	1928	(53,77)	923	(53,77)
4	(-18,18)	(47,83)	648	(47,83)	1858	(47,83)	225	(47,83)
5	(-24,24)	(41,89)	576	(41,89)	1852	(41,89)	109	(41,89)
6	(-30,30)	(35,95)	433	(35,95)	1685	(35,95)	-871	(35,95)
7	(-36,36)	(29,101)	339	(29,101)	1610	(29,101)	-1141	(29,101)
8	(-42,42)	(23,107)	317	(23,107)	1594	(23,107)	-981	(23,107)
9	(-48,48)	(17,113)	369	(17,113)	1475	(17,113)	-1131	(17,113)
10	(-54,54)	(11,119)	329	(11,119)	1757	(11,119)	106	(11,119)
11	(-60,60)	(5,125)	261	(5,125)	1922	(5,125)	744	(5,125)
12	(-66,66)	(-1,131)	-101	(65,65)	-1181	(55,96)	-1627	(55,96)
13	(-72,72)	(-7,137)	-6	(65,65)	-100	(57,75)	492	(57,75)
14	(-78,78)	(-13,143)	-74	(65,65)	-2821	(43,98)	-3492	(43,98)

Tableau 4-2. Résultats de l'application des trois méthodologies de seuillage.

Les remarques que l'on peut extraire à partir de ces résultats, présentés sur le tableau 4-2, sont les suivantes. La méthode 1 est fidèle, c'est à dire, elle nous donne les résultats corrects jusqu'à un déplacement de (-60, 60 pixels). Si nous considérons que l'image mesurait 128 x 128 pixels, cela veut dire qu'on peut détecter des déplacements qui soient pratiquement la moitié de l'image. Si l'on considère d'autres tailles de sous-fenêtres, nous pouvons dire que la limite de faisabilité de l'algorithme se trouverait aux déplacements de la moitié de la taille de la sous-fenêtre.

La méthode 2, même que la méthode 1 nous fourni des résultats corrects, mais nous la considérons la plus efficace pour faire le seuillage tandis que le rang de discrimination est plus large. La méthode 3 nous donne la position correcte des déplacements effectués, mais nous ne pouvons pas utiliser la différence des moyennes pour voir s'il y a eu mouvement ou pas, étant donné qu'il n'existe pas une valeur de seuillage qui le détermine. Avec la méthode 1 et 2, cette discrimination est possible parce que nous pouvons faire le seuillage sur la valeur zéro.

Nous avons choisi et considéré comme plus performante la méthode 2 parce que le rang de valeurs est plus large que dans la méthode 1.

4.2.4 Résultats obtenus en appliquant la méthode adaptative.

Calcul de la vitesse apparente en surface (2D).

Après avoir décrit l'algorithme utilisé nous allons vous présenter les résultats obtenus en utilisant la méthode adaptative sur les avalanches du 12 Mars 91, du 15 Janvier 92 et du 10 Avril 92. N'oublions pas que les enregistrements vidéo dont nous disposons furent obtenus comme complément des études sur l'instrumentation d'un site avalancheux réalisé par Marco (1994). Nous parlons de vitesse apparente, étant donné que nous sommes en train d'étudier un phénomène 3D, à partir d'un enregistrement vidéo (2D). Ainsi, nous allons essayer de résoudre d'abord le problème en 2D.

Parmi ces résultats, à partir des enregistrements vidéo des avalanches du 12 Mars 91, du 15 Janvier 92 et du 10 Avril 92, nous avons fait la distinction entre l'étude spatiale et l'étude temporelle. Il s'agit d'une nomenclature particulier pour pouvoir définir une étude faite initialement à partir de couples d'images dont la finalité est de vérifier les algorithmes. Nous appelons étude spatiale l'étude qui montre les vecteurs déplacement sur un couple d'images consécutives (p.e. image 4-4). Nous appellerons étude temporelle celle qui montre toute la séquence de l'avalanche. Dans ce deuxième cas nous pouvons obtenir les graphiques des vitesses de l'avalanche en fonction du temps.

4.2.4.1 Etude spatiale.

L'étude spatiale consiste à faire des comparaisons entre couples d'images successives et, comme résultat fournir les vecteurs déplacement. Par la suite nous expliquerons la démarche que nous avons suivie. Une fois les images numérisées, il nous faut d'abord définir la zone de l'image présentant un mouvement que nous voulons étudier.

Prenons un couple d'images numérisées de l'avalanche du 15 Janvier 92. Dans l'image 4-10 nous pouvons observer une image numérisée, de taille 768 x 480 pixels, de cette avalanche. Dans cette image nous avons signalé à l'aide d'un carré blanc la zone utilisée pour faire l'étude du champ des vecteurs (256 x 320 pixels), à droite. On peut aussi remarquer le support de capteurs profilé en aile d'avion, et qui apparaît comme un rectangle noir situé à gauche de l'image 4-10.

Dans ce qui suit, on a appliquée la méthode indiquée dans la figure 4-1.

On a utilisé sous-fenêtres de 64 x 64 pixels décalées de 16 pixels dans chacune de deux directions. En considérant la taille de la zone étudiée (256 x 320 pixels), la taille des sous-fenêtres et les pixels de décalage nous obtenons 13 déplacements dans le sens horizontal et 7 dans le sens vertical. $13 \times 7 = 91$ sous-fenêtres au total qui nous fourni une estimation du déplacement en 91 points de la région étudiée.



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.

Ces déplacements sont représentés par des segments sur l'image 4-11.

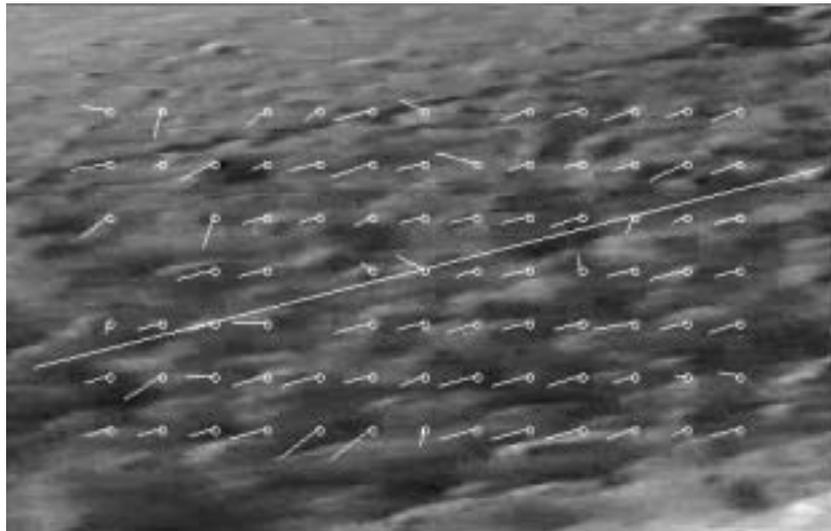


Image 4-11. Déplacements du couple: Paire N - Paire N+1; Impaire N - Impaire N+1. La ligne blanche nous montre la direction de la pente du couloir.

Les images 4-12 et 4-13 représentent les moyennes des fonctions $h(x,y)$ (équation 4-10) obtenues dans chacun des deux procédures de nôtre méthodologie (étape 4, procédures a et b).

Compte tenu que l'origine (0,0) est au centre de l'image et le sens positif des x vers la gauche et le sens positif des y vers le bas, on vérifie que le vecteur déplacement obtenu lorsque l'on travaille par différence de trames de deux images différentes (étape 4, procédure b. $\Delta t=1/50$ s), est de 8 pixels en x et 2 pixels en y. Le déplacement obtenu lorsque l'on travaille sur les différences des trames d'une même image (étape 4, procédure a. $\Delta t=1/25$ s), est de 16 pixels en x et 4 pixels en y.

Chaque fonction $h(x,y)$ présente, à quelques exceptions près, un maximum dans une zone de plus ou moins 5 pixels autour du maximum moyen. Cela signifie que l'écoulement observé est assez uniforme, les fluctuations des déplacements n'excèdent pas 50% de la valeur moyenne. Pour illustrer les fluctuations de vitesses observées dans cette région de l'écoulement nous avons représenté sur l'image 4-14 le module de la vitesse (m/s) en fonction de la position (pixels).



Image 4-12
Moyenne des Fonctions de Transfert des couples
Paire N – Impaire N
Paire N+1 – Impaire N+1
Procédure b)



Image 4-13
Moyenne des Fonctions de Transfert des couples
Paire N – Paire N+1
Impaire N – Impaire N+1
Procédure a)

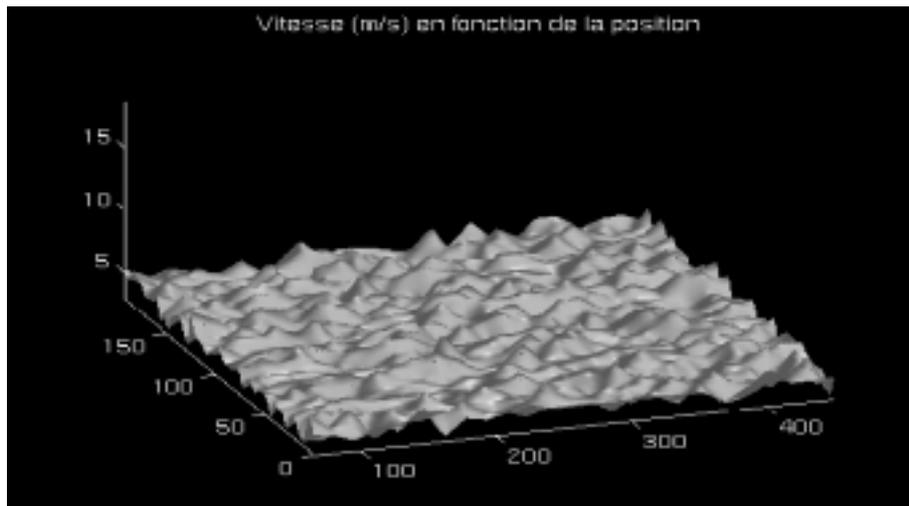


Image 4-14. Vitesse (m/s) en fonction de la position (pixels). La position (0,0) correspond au coin inférieur gauche de l'image 4-11.

D'autre part, un étalonnage de l'image réalisé dans le plan du support des capteurs situé à gauche de l'image 4-10, donne une distance de 85 pixels par mètre, ce qui conduit à un déplacement moyen de 20 cm pendant 1/25 s. La vitesse moyenne correspondante est donc de 5 m/s. Nous vérifions également sur l'image 4-11 que les déplacements mesurés décroissent en fonction de la distance à la caméra, ceci s'explique par la profondeur de champ utilisée et donc par la différence entre la vitesse apparente sur le plan image et la vitesse réelle dans l'espace objet.

Ces résultats, obtenus avec deux images consécutives, nous ont encouragés et l'étude fut élargie aux trois enregistrements d'avalanches que nous avons à notre disposition. Les résultats que nous présentons ensuite incluent 178 images de chacune de trois avalanches. C'est à dire, plus ou moins 7 secondes d'enregistrement par avalanche.

Pour chacune des avalanches nous avons choisi une zone d'étude dont la grandeur de laquelle est fonction de la présence de l'avalanche dans la scène. En fonction de la vitesse de chaque avalanche nous choisirons la grandeur des fenêtres, ainsi nous prendrons des fenêtres de 64 x 64 pixels ou de 128 x 128 pixels. Dans l'objectif d'avoir un maximum de points d'information nous considérons que un balayage de 1/16 de la fenêtre d'étude nous procurera un bon réseau de points. Pour les fenêtres de 64 x 64 pixels le déplacement effectué est de 4 pixels et, pour les fenêtres de 128 x 128 pixels le déplacement sera de 8 pixels. Pour réaliser l'étude de la densité spectrale du bruit il faut choisir une zone de l'image qui ne contient pas aucune partie de l'écoulement.

Nous avons utilisé la méthode pour trois avalanches :

- Avalanche du 12 Mars 1991
- Avalanche du 15 Janvier 1992
- Avalanche du 10 Avril 1992

Avalanche du 12 Mars 1991



Image 4-15. Photogramme de l'avalanche du 12 Mars 91. A gauche, en bas, un support de capteurs profilé en aile d'avion.

L'étude seulement a pu être réalisée sur une série de 178 images, ~ 7 secondes. La taille de la région étudiée pour cette avalanche est de 344 x 144 pixels (tableau 4-3). Nous avons utilisé des sous-fenêtres de taille 128 x 128 pixels déplacées de 8 pixels, soit au total 224 sous-fenêtres pour chaque image de la série, cela signifie qu'on a $224 \times 178 = 39.872$ sous-fenêtres de 128 x 128 pixels à traiter. Le déplacement moyen obtenu est (32,8) pixels pendant les trois premières secondes de l'écoulement et (24,6) pixels après. D'autre part, un étalonnage de l'image réalisé dans le plan du support des capteurs situé à gauche de l'image 4-15, donne une distance de 61 pixels par mètre, ce qui conduit à un déplacement moyen de 59 cm au début de l'avalanche et 47 cm trois secondes après. Les vitesses moyennes correspondantes, en considérant que la différence de temps entre les deux trames des deux images consécutives est de $1/25$ s, sont donc de 14,7 m/s et 11 m/s (tableau 4-4). Dans la figure 4-2 on montre une représentation des vitesses en pixels par frame (photogramme).

Avalanche	No. Imag.	T.Z.E.	T. Fenêt.	d	No.Fenêt.	T.p. (cm)
Mars 91	178	344x184	128x128	8	224	1.64
Janvier 92	178	220x160	64x64	4	1000	1.20
Avril 92	178	448x224	128x128	8	533	1.16

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).

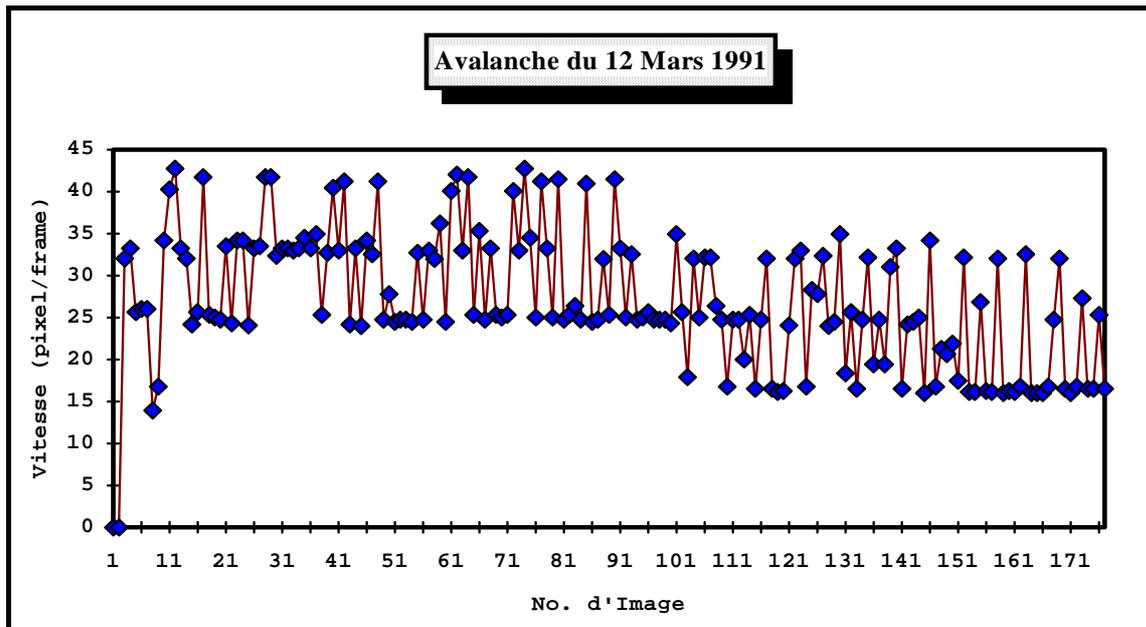


Figure 4-2. Echantillon de l'avalanche de Mars 1991. Vitesse en pixels par frame (photogramme) sur une série de 178 images.

Avalanche du 15 Janvier 1992.



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.

Nous avons travaillé sur une série de 178 images. La taille de la région étudiée dans ce cas est de 220 x 160 pixels. Les sous-fenêtres ont une taille de 64 x 64 pixels, et ont été déplacées de 4 pixels. Nous obtenons au total 1000 sous-fenêtres pour chaque image de la série (tableau 4-3). Pour toute la série d'images on a $1000 \times 178 = 178000$ sous-fenêtres de 64 x 64 pixels. Le déplacement obtenu est (16,4) pixels au début et (8,2) pixels 4 secondes après. L'étalonnage

réalisé dans le plan du support des capteurs situé à gauche de l'image 4-16, donne une distance de 83 pixels par mètre, ce qui conduit en 1/25 s à un déplacement moyen de 22 cm au début de l'écoulement et 11 cm à 4 secondes du début. Les vitesses moyennes correspondantes sont donc 5,4 m/s et 2,7 m/s (voir figure 4-3 et tableau 4-4).

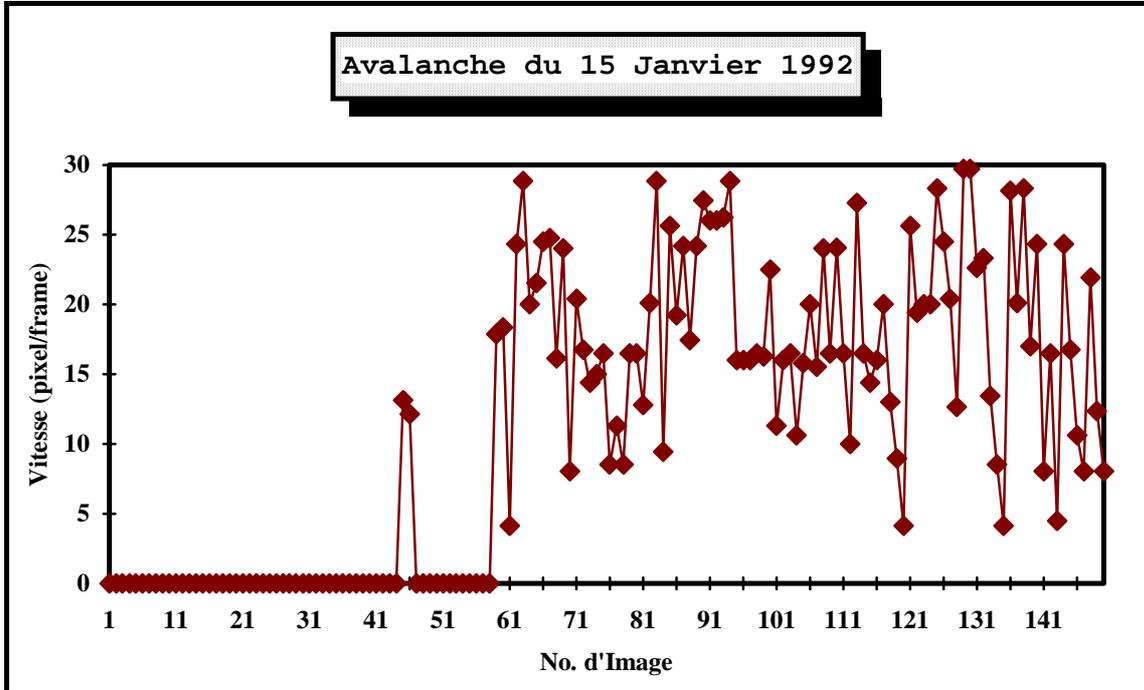


Figure 4-3. Echantillon de l'avalanche de Janvier 1992. Vitesse en pixels par frame sur une série de 178 images.

Avalanche du 10 Avril 1992

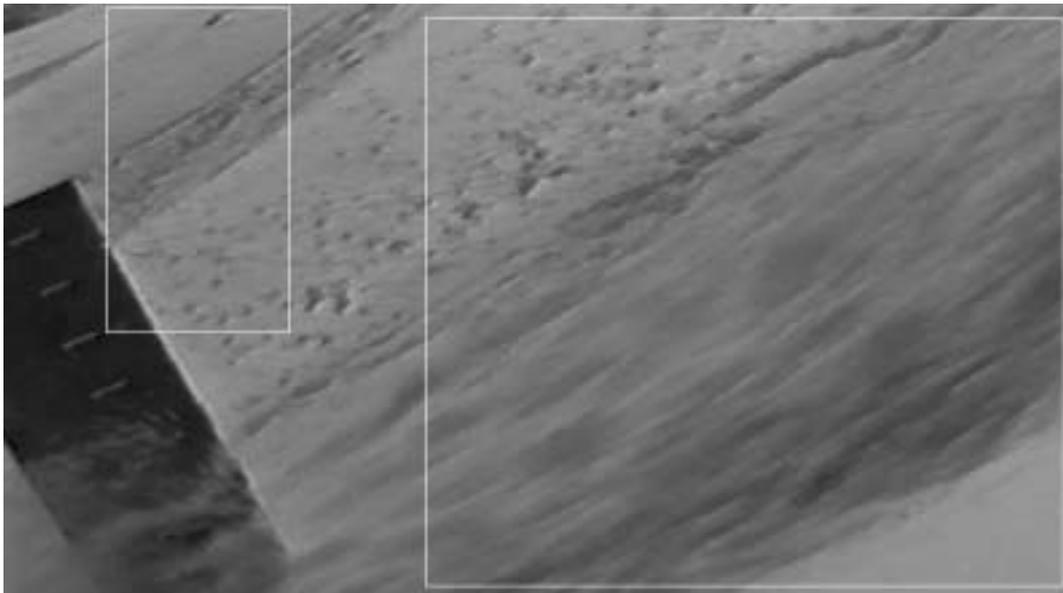


Image 4-17. Image de l'avalanche du 10 Avril 1992. A gauche, en bas, le support de capteurs profilé en aile d'avion, en haut, fenêtre déterminant la portion de surface utilisée pour calculer la densité spectrale du bruit (utilisée ultérieurement dans l'étude temporelle). A droite: fenêtre déterminant la portion de surface étudiée.

Pour cette troisième avalanche, on a utilisé une série de 178 images et la taille de la région étudiée est de 448 x 224 pixels (tableau 4-3). Les sous-fenêtres ont une taille de 128 x 128 pixels déplacées de 8 pixels, au total on a 533 sous-fenêtres pour chaque image et 533 x 178 = 94874 sous-fenêtres 128 x 128 pour toute la série. Le déplacement moyen obtenu est de (40,12) pixels au début de l'avalanche, (32,12) pixels 1 seconde après, et (24,8) pixels après les quatre premières secondes de l'écoulement. D'autre part, un étalonnage de l'image réalisé dans le plan du support des capteurs situé à gauche de l'image 4-17, donne une distance de 87 pixels par mètre, ce qui conduit en 1/25 s à un déplacement moyen de 54 cm au début, 46 entre le premier et troisième seconde et de 33 cm après la troisième seconde. Les vitesses moyennes correspondantes sont donc: 13,5 m/s, 11,6 m/s et 8,4 m/s (voir figure 4-4 et tableau 4-4).

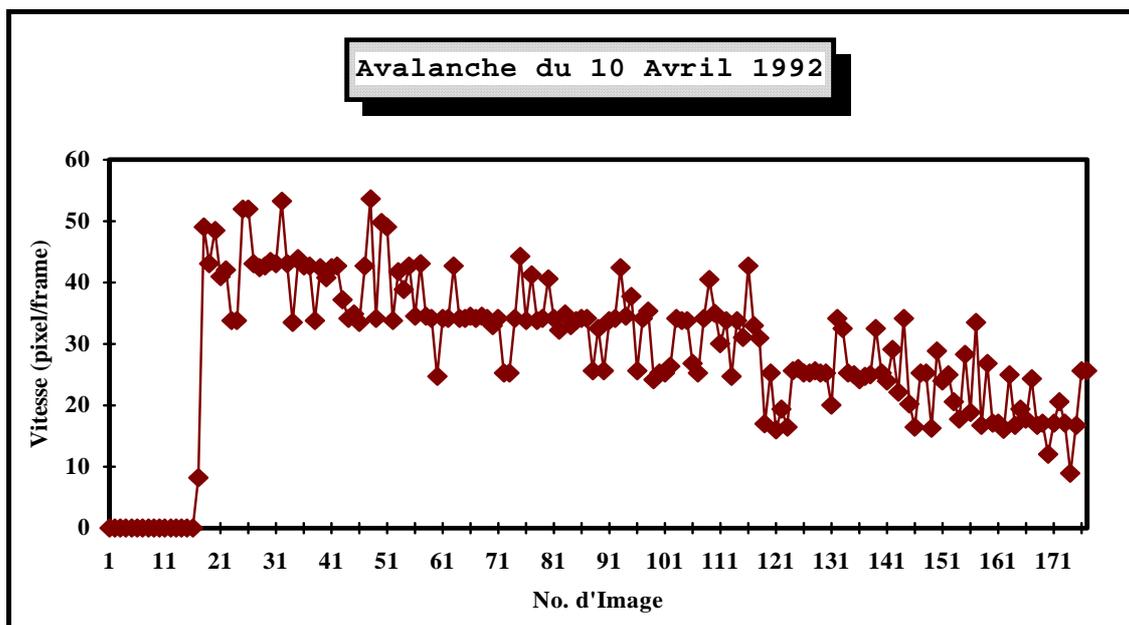


Figure 4-4. Echantillon de l'avalanche d'Avril 1992. Vitesse en pixels par frame sur une série de 178 images.

Avalanche	Vitesse Intervalle 1 (m/s)	Vitesse Intervalle 2 (m/s)	Vitesse Intervalle 3 (m/s)
12 Mars 91	14.7	11.0	
15 Janvier 92	5.4	2.7	
10 Avril 92	13.5	11.6	8.4

Tableau 4-4. Comparaison des vitesses des trois avalanches dans les différents intervalles.

Pendant l'intervalle de temps que représentent les 178 images, à peu près 7 secondes, de chacune des avalanches, nous pouvons observer certains détails (tableau 4-4). Dans un premier temps, nous pouvons dire que l'avalanche du 15 Janvier, plutôt qu'une avalanche, il s'agit d'une petite coulée de neige, étant donné qu'elle présente des vitesses plus petites. De toute façon, nous pouvons distinguer deux vitesses différentes pendant cette période de temps. La vitesse de cette avalanche est à peu près de 5 m/s au début de la coulée, puis elle diminue, après 4 secondes, jusqu'à 2,7 m/s, corps de la coulée. Ces vitesses si faibles nous indiquent que le choix des fenêtres de 64 x 64 pixels (tableau 4-3) afin de

réaliser des mesures de déplacement a été correcte. Rappelons nous que pour des petites vitesses nous permettent choisir des fenêtres d'étude plus petites. En relation aux deux autres avalanches, leurs vitesses sont presque trois fois plus grandes, ce qui fait qu'on puisse arriver à des vitesses importantes de l'ordre de 14 ou 15 m/s au début de l'avalanche. La différence entre l'avalanche du 12 Mars 91 et celle du 10 Avril 92 c'est que pendant les 7 secondes d'enregistrement, la première présente un début et un corps à deux vitesses pendant que le corps maintient la même vitesse pendant la durée de la série d'images. L'avalanche du 10 Avril présente une vitesse au début de 13,5 m/s. Par contre, pendant ces 7 secondes nous pouvons remarquer que la vitesse du corps diminue légèrement et passe de 11,6m/s à 8,4 m/s.

Conclusion et perspectives de l'étude spatiale.

Ces premiers résultats prouvent qu'il est possible de mesurer par traitement d'images la distribution des vitesses à la surface d'un écoulement de neige dense en traitant numériquement les images obtenues dans des conditions standard de prise de vues. En l'état actuel de l'étude, une estimation correcte de la précision des résultats est encore difficile à fournir. Il nous faut, entre autres choses, améliorer la précision des algorithmes de calcul avec l'introduction du bruit. Cependant ces traitements effectués sur un grand nombre de couples d'images ont toujours fourni des résultats cohérents. Plusieurs problèmes restent encore à traiter. L'étalonnage tridimensionnel des images utilisant des repères connus sur le terrain permettra une évaluation exacte de la vitesse. Enfin l'étude de l'influence de la topographie du terrain sur la distribution des vitesses doit permettre une meilleure compréhension de la dynamique de l'écoulement.

4.2.4.2 Etude temporelle.

À partir des résultats obtenus dans l'étude spatiale nous avons tenté de généraliser la méthode à l'étude d'une avalanche complète. Notre objectif dans cette partie du chapitre est donc, de vous présenter les résultats obtenus en appliquant cette méthodologie aux trois avalanches pour lesquelles nous disposons d'un enregistrement vidéo.

Voici la méthodologie appliquée dans ce cas. L'introduction du calcul du bruit représente un progrès. C'est-à-dire que l'on fait une estimation du bruit présent dans les images. L'introduction du bruit calculé dans une zone sans mouvement de la scène nous permet, on le verra, d'améliorer les résultats obtenus en utilisant la méthode adaptative. Le bruit est dû à petits changements de niveau de gris dans les images. Ces changements peuvent avoir différentes origines, dues à l'électronique des appareils enregistreurs ou dues à une variation de la luminosité environnementale. Il faut se souvenir que nous travaillons à l'extérieur et que les conditions d'illumination nous sont imposées.

Les images utilisées pour faire l'étude temporelle, c'est à dire, les enregistrements vidéo, sont les mêmes que celles utilisées pour faire l'étude spatiale. Mais si pour l'étude spatiale on avait travaillé avec des séries de 178 images consécutives, pour l'étude temporelle nous travaillons avec toute la séquence de l'avalanche.

Ainsi, nous avons 409 images pour l'avalanche du 12 Mars 91, 223 pour l'avalanche du 15 Janvier 92 et 531 images pour l'avalanche 10 d'Avril 92.

Une fois obtenues les séries d'images, nous cherchons d'abord, visuellement, les zones les plus intéressantes des images, zones contenant l'écoulement, afin de faire l'étude de chacune des avalanches. Nous cherchons donc la zone d'étude. Nous cherchons aussi les zones plus idoine, zones ne contenant pas l'écoulement tout au long de la série d'images, pour l'étude de la densité spectrale du bruit dans chacune des avalanches. De ces deux types de zones nous parlerons pour chaque cas particulier quand nous analyserons chacune des avalanches.

Nous utilisons le script **soroll** développé pour nous, qui utilise les fonctions du DxlImage et que vous retrouverez en annexe, pour effectuer le calcul du bruit.

Une fois le calcul du bruit et la numérisation des séries d'images faites, nous pouvons appliquer notre méthode au calcul des vitesses de surface d'une avalanche de neige dense. L'algorithme se trouve résumée dans le script **totesphasesR-tot** (voir annexe). La première mission du script **totesphasesR-tot** est de détramer les images, le détramage est fait en utilisant la fonction **detrame** (voir annexe), il s'agit d'une fonction implantée pour nous dans le logiciel DxlImage. Cette fonction nous permet d'extraire la trame paire et la trame impaire de l'enregistrement vidéo. En faisant cette opération nous doublons le nombre d'images, c'est à dire la résolution temporelle, mais on perd de la résolution spatiale dans la direction verticale, y. Nous obtenons ainsi le double du nombre initial d'images, mais chacune de taille 768 x 240 pixels. On perd, donc, en résolution verticale en passant de 480 pixels à 240 pixels.

Une fois les images détramées, nous faisons la soustraction des trames d'une même image. Ainsi nous obtenons une image qui représente, en niveau de gris de 0 à 255 les zones de la scène qui ont subi un déplacement. La valeur 0 (noir) correspond aux zones avec déplacement nul et la valeur 255 (blanc) correspond aux zones avec un déplacement maximum.

Ensuite nous divisons la zone à étudier en sous-fenêtres carrées dont la largeur est fonction de la vitesse de l'avalanche, a priori estimée visuellement. Puis nous démarrons le calcul des fonctions de transfert des n sous-fenêtres de chaque image. Dans chaque image nous considérons d'abord la zone à étudier et dans cette zone à étudier nous balayons une sous-fenêtre carrée qui générera la globalité des sous-fenêtres. Avant de calculer la fonction de transfert de toutes les sous-fenêtres, nous multiplions celles-ci par une fenêtre d'Hamming (Kunt, 1981)

$$w(i_1, i_2) = \left(0.54 + 0.46 * \cos\left(\frac{\pi i_1}{l_1}\right) \right) \left(0.54 + 0.46 * \cos\left(\frac{\pi i_2}{l_2}\right) \right) \text{ pour } i_1 \leq l_1 \text{ et } i_2 \leq l_2; \text{ et}$$

$w(i_1, i_2) = 0$ ailleurs, i_1 et i_2 représente la position du pixel dans l'image et, l_1 et l_2 représentent la taille de l'image en colonnes et files. Ce produit nous aidera à minimiser l'effet que peut produire la forme carrée des sous-fenêtres dans l'espace des fréquences. Après avoir fait ce prétraitement nous appliquons la fonction **wienerb** (voir annexe) qui nous donnera comme résultat, selon la théorie

développée antérieurement (Eq. 4-10), le déplacement qu'a subi la scène entre une image et l'image suivante.

Une fois obtenues les fonctions de transfert partielles pour chaque image nous les additionnons et nous regardons s'il y a eu mouvement ou non. Nous considérons qu'il y a eu mouvement quand la moyenne des niveaux de gris de la zone où on attend le mouvement est supérieure à la moyenne générale de toute l'image. L'algorithme, après nôtres indications, considère un seuil de coupure: un certain niveau de gris. Si le seuil est dépassé l'algorithme considère qu'il y a eu mouvement, sinon l'algorithme considère que pour cette sous-fenêtre en particulier il n'y a pas eu mouvement. Si l'algorithme considère qu'il y a eu mouvement, l'algorithme regarde automatique et individuellement toutes les sous-fenêtres pour constater s'il y a eu du mouvement ou non.

Nous créons de cette façon des archives qui contiennent l'information de mouvement de chaque image.

Après avoir détaillé le processus algorithmique, nous allons présenter les résultats obtenus sur les 3 séquences vidéo dont nous disposons.

Avalanche du 12 Mars de 1991

Sur l'image 4-18 se présente un photogramme de l'avalanche du 12 Mars 91. Nous pouvons observer les zones d'applications de nos algorithmes, la zone d'étude du champ de vitesses et la zone choisie pour faire le calcul du bruit.



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.

Avant de montrer les résultats, arrêtons-nous sur quelques considérations numériques. Pour cette avalanche, la zone d'étude a une taille de 240 x 136 pixels, la largeur des sous-fenêtres est de 128 x 128 pixels et, le déplacement de la sous-fenêtre qui balaye est de 8 pixels. Ainsi nous obtenons finalement 30

sous-fenêtres par image (figure 4-15 et 4-16). Pour chaque image de 240 x 136 pixels nous avons 30 points où calculer le déplacement moyen d'une sous-fenêtre de 128 x 128 pixels. C'est à dire nous avons obtenue une valeur de la vitesse moyenne de cette sous-fenêtre tous les 8 pixels, qui correspond à 1/16 de l'image 128 x 128. Nous pensons qu'il s'agit d'un ordre de grandeur de la couverture des sous-fenêtres suffisant pour obtenir des résultats significatifs. En fonction des dimensions de la zone d'étude, de la sous-fenêtre et de son déplacement nous avons 15 points de mesure dans la direction horizontale, x , et 2 dans la direction verticale, y .

Pour cette avalanche, la numérisation de la bande vidéo comporte une série de 409 images. Ce sont les 409 images que nous aurons à traiter afin d'obtenir le graphique des vitesses.

Un étalonnage de l'image réalisé dans le plan du support des capteurs, donne une distance de 61 pixels par mètre. Ainsi en première approximation nous pourrions obtenir une estimation des vitesses en mètres par seconde. Nous avons pris une zone d'étude étroite afin de réduire au minimum les problèmes dérivant de la profondeur du champ.

Après avoir vu les considérations numériques, nous allons montrer les résultats obtenus pour cette avalanche.

D'abord il est présenté le résultat obtenu dans deux des sous-fenêtres. Concrètement nous présentons les résultats de la sous-fenêtre n_0 1 (figure 4-5), qui correspond à la partie gauche en haut de la zone d'étude, et la sous-fenêtre n_0 30 (figure 4-6), qui correspond à la partie droite en bas de la zone d'étude (image 4-18).

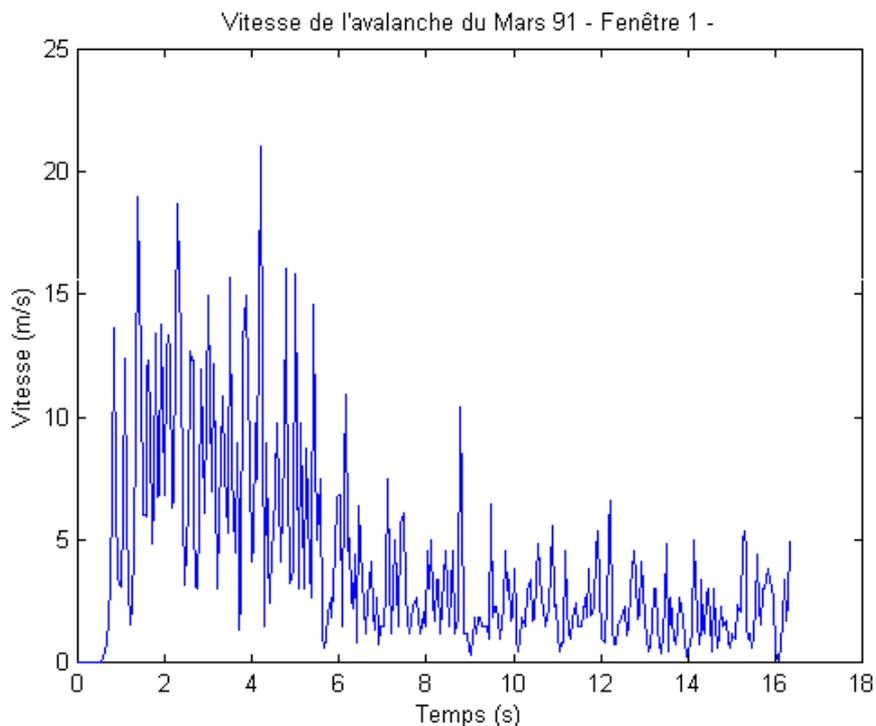


Figure 4-5. Vitesse de l'avalanche du 12 de Mars 91 correspondant à la sous-fenêtre n_0 1.

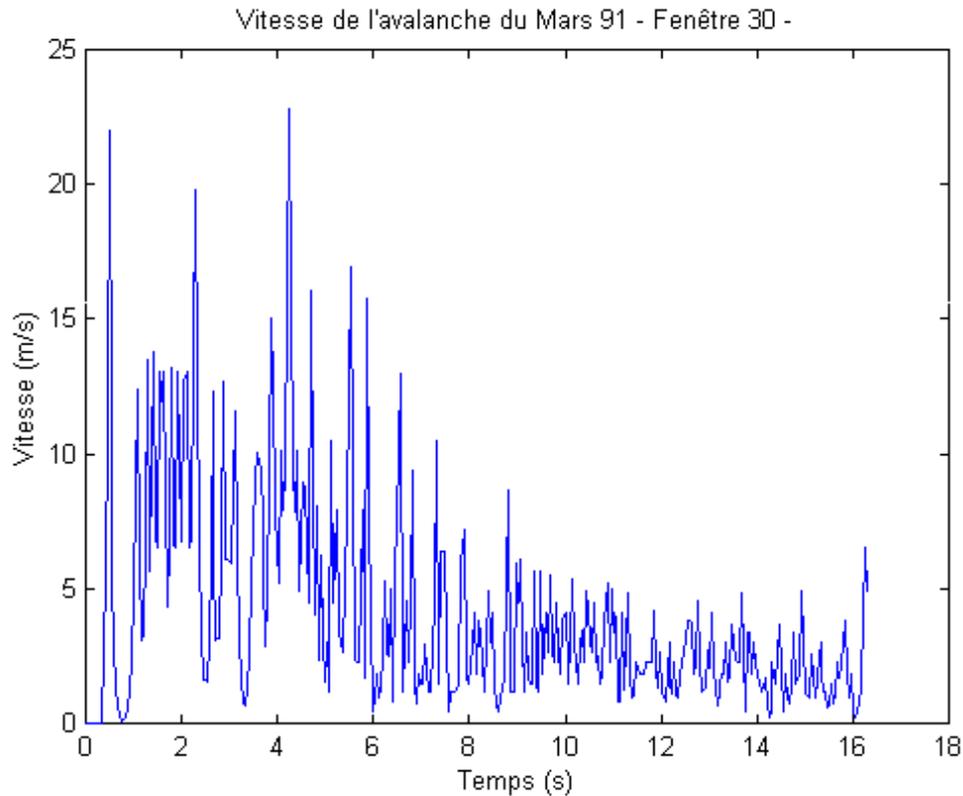


Figure 4-6. Vitesse de l'avalanche du 12 de Mars 91 correspondant à la sous-fenêtre n^o 30.

Sur les figures 4-5 et 4-6 nous pouvons observer que la vitesse de l'avalanche du mois de Mars 91 présente un maximum, autour de 15 m/s avec de pics qui dépassent les 20 m/s, au début de l'avalanche descendant progressivement jusqu'à des valeurs près de zéro. Nous observons quelques fois, au cours du temps, que la vitesse devient 0 ou près de 0. Ce résultat n'est pas dû au fait que l'avalanche se soit arrêtée ou qu'il n'existe pas de flux de neige, mais au fait que ces zéros sont dus au système de détection que nous utilisons pour contrôler s'il y a eu déplacement ou non. Dans ce cas l'algorithme considère qu'il n'y a pas eu mouvement et prend la vitesse égale à zéro. Evidemment il s'agit d'une indétermination de la méthode qui est peu significative par rapport à l'évolution de la courbe.

Dans la figure 4-7 nous montrons les résultats de la vitesse obtenus en autres 9 points de la zone d'étude pour cette avalanche. Il s'agit des fenêtres 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 et 27. On peut observer que les graphiques se ressemblent. On développera un peu plus la ressemblance entre les graphiques dans le paragraphe dédié à la **corrélation**.

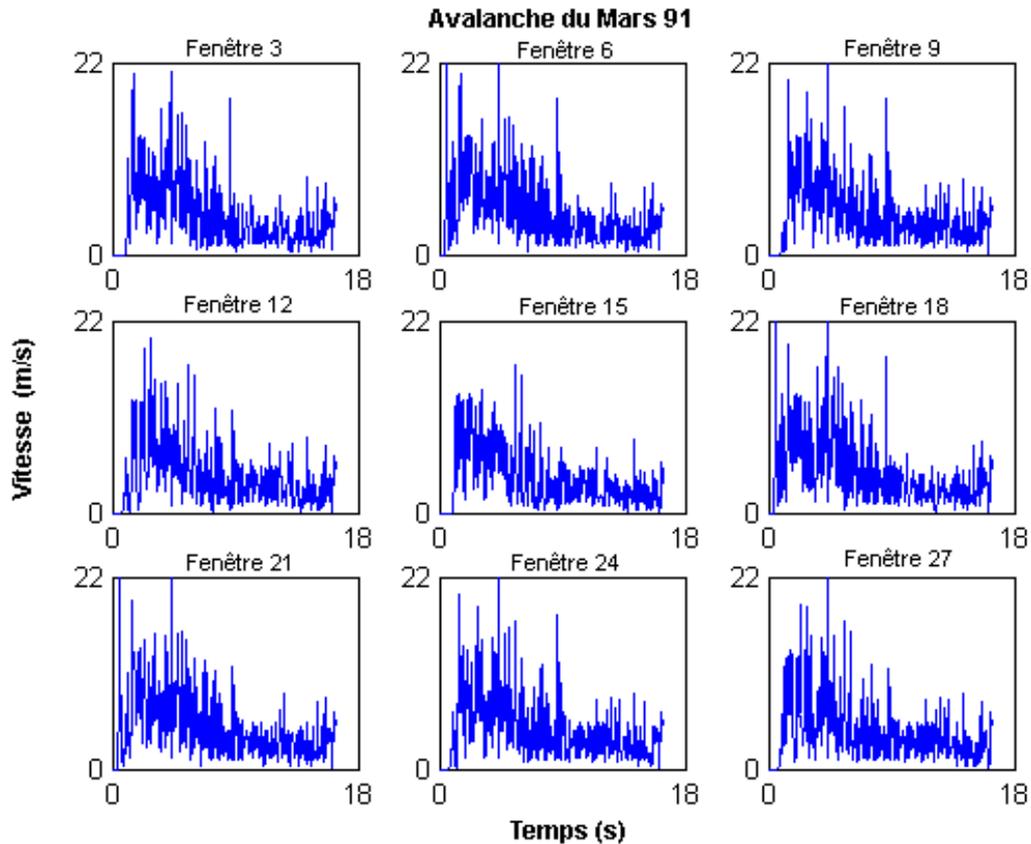


Figure 4-7. Vitesse de l'avalanche du 12 de Mars 91 correspondant aux sous-fenêtres 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 et 27.

Nous présentons ensuite les résultats correspondants à une vitesse que nous appellerons improprement vitesse moyenne de l'avalanche en fonction du temps. Par vitesse moyenne entre une image et l'image suivante, nous entendons le déplacement subi par l'avalanche entre la fenêtre qui conforme la zone d'étude (320 x 136 pixels) et la même zone mais de l'image suivante. Rappelons que notre méthodologie cherche le déplacement subi par l'avalanche entre une région de 128 x 128 pixels d'une image et la même position de 128 x 128 pixels dans l'image suivante. Dans ce cas notre zone d'étude contient 30 sous-fenêtres de 128 x 128 pixels. Nous obtenons ainsi d'après l'application de l'algorithme 30 fonctions de transfert qui nous montrent le déplacement entre deux fenêtres consécutives pendant ce temps. Ainsi notre vitesse moyenne d'une image sera obtenue à partir de la contribution des 30 fonctions de transfert de chaque image. Nous présentons la graphique de la vitesse moyenne en fonction du temps pour l'avalanche du 12 Mars 91.

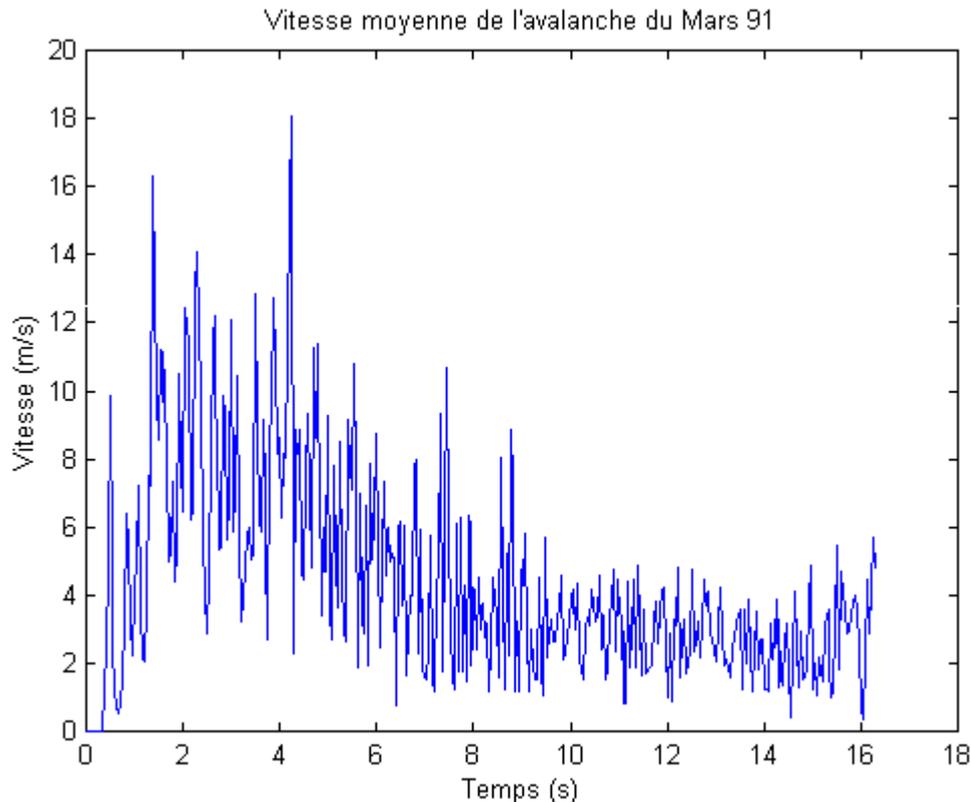


Figure 4-8. Vitesse moyenne de l'avalanche du 12 Mars 91.

Sur la figure 4-8 nous avons placé les résultats obtenus pour le calcul de la vitesse moyenne. Nous rappelons qu'une avalanche, en général, comprend trois parties: le front, le corps et la queue. Sur la figure 4-8 on apprécie ces trois zones. Au début l'avalanche arrive avec une vitesse d'environ 14 m/s diminuant progressivement par la suite. Le corps de l'avalanche passe au niveau du support des capteurs (image 4-11) à une vitesse de 8 m/s. Les erreurs et la résolution des données et la méthodologie seront traités plus tard, mais à ce point j'aimerais faire une remarque. Si l'on considère que l'erreur minimum est le pixel, selon les calculs que nous avons fait le pas minimum de la vitesse est de 0,4 m/s. C'est à dire que nous avons une indétermination minimale pour les vitesses d'au moins 0,4 m/s. Pour des vitesses de 18 m/s l'erreur minimum est de 2,2% et, pour des vitesses de 5 m/s elle monte jusqu'à 8%. Plus petite est la vitesse plus grande est son indétermination. C'est à dire que l'efficacité de la méthode décroît pour les petites vitesses.

Nous pouvons aussi remarquer que ce signal présente une forte tendance à être légèrement masqué par une haute fréquence. Nous allons essayer de filtrer ce signal pour voir si nous pouvons éliminer les hautes fréquences. Nous utiliserons un filtre de Butterworth et un filtre de Chebyshev, filtres passe bas. Sur les figures 4-9 et 4-10 nous présentons les résultats de l'application des filtres. Pour le calcul de la vitesse moyenne et des résultats de l'application des filtres nous avons créé le script de Matlab **allau_mars91** que vous retrouverez en annexe.

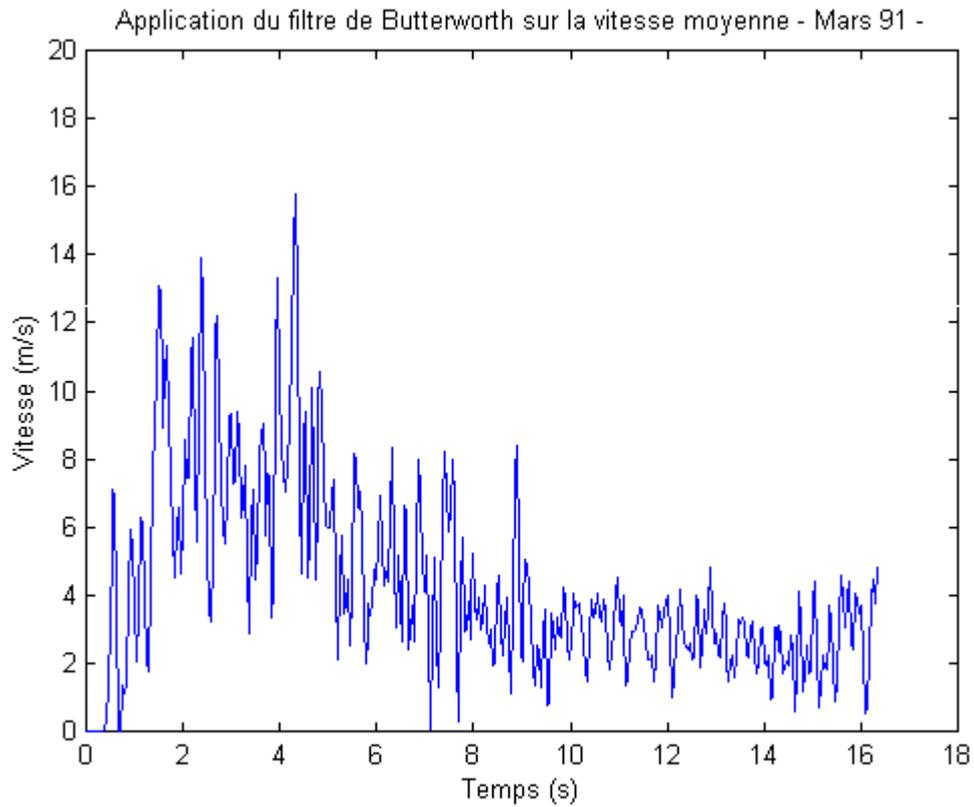


Figure 4-9. Vitesse moyenne de l'avalanche du 12 Mars 91. Après l'application du filtre de Butterworth.

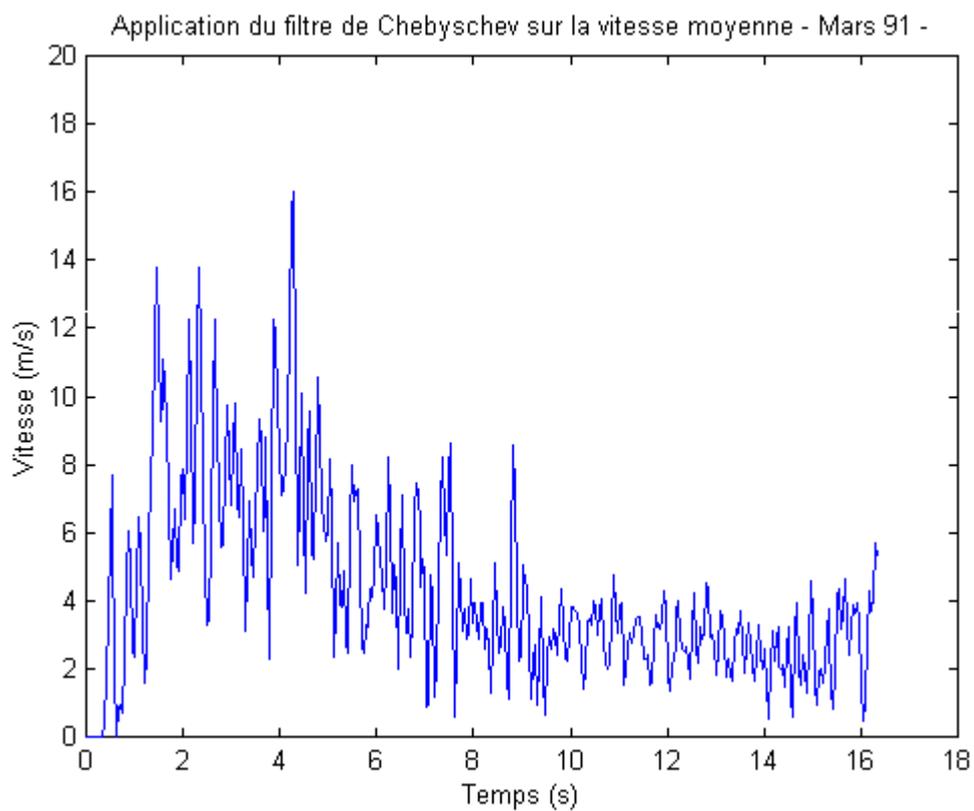


Figure 4-10. Vitesse moyenne de l'avalanche du 12 Mars 91. Après l'application du filtre de Chebyshev.

Dans la figure suivante (figure 4-11) on peut apprécier le signal original, la vitesse moyenne, et superposés les résultats de l'application de deux filtres.

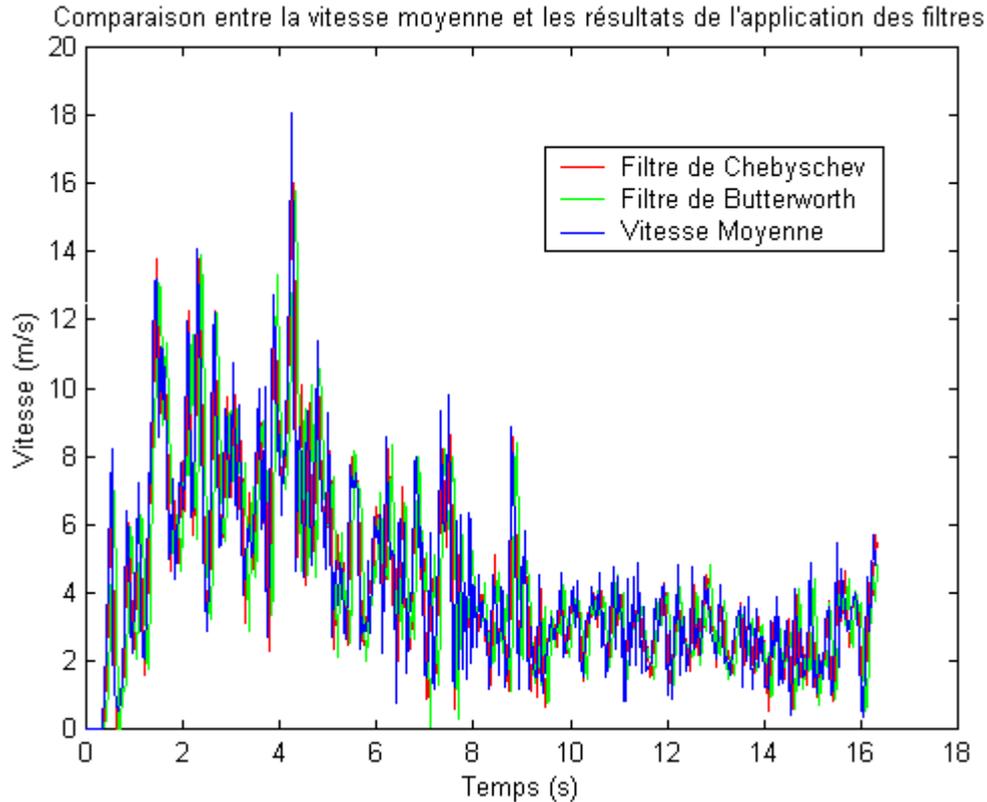


Figure 4-11. Vitesse moyenne et résultats de l'application des filtres de Butterworth et de Chebyshev. Avalanche du 12 Mars 91.

On observe que les résultats de l'application de deux filtres sur les données de la vitesse moyenne suivent, comme on avait envisagé, le trait principal du graphique. À partir de ce point là, nous avons choisi pour faire les filtrages le filtre de Chebyshev. Les résultats de l'application du filtre de Chebyshev s'adaptent mieux que ceux de Butterwoth qui présentent un léger décalage.

Pour obtenir une graphique plus adoucir de la vitesse moyenne il nous faut écarter les hauts fréquences. Nous considérons, donc, les données de la vitesse moyenne et les résultats de l'application du filtre de Chebyshev sur ces données. À partir de là nous faisons un lissage d'ordre 5 et nous obtenons comme à résultat la graphique de la figure 4-12. La graphique de la figure 4-12 nous donne le profil des vitesses au cours du temps pour l'avalanche du Mars 91. On peut apprécier qu'il y a deux vagues du front qui sont arrivés et après l'écoulement perd vitesse tandis que le corps de l'avalanche est en train de passer en face de la zone d'étude.

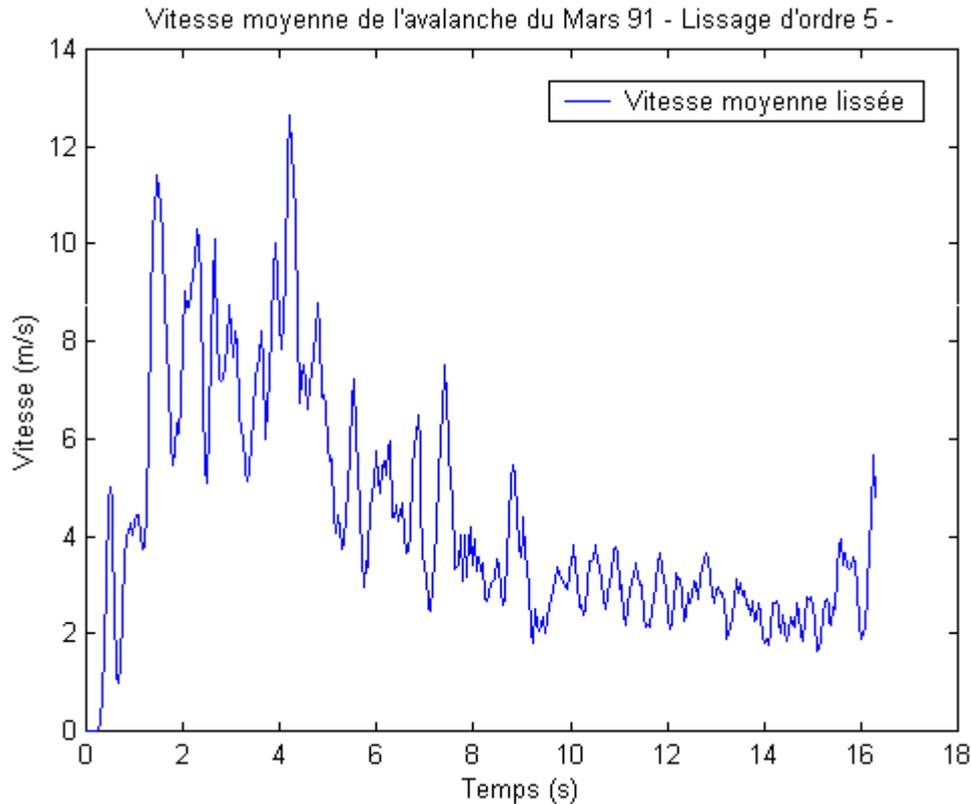


Figure 4-12. Vitesse moyenne de l'avalanche du 12 Mars 91, après l'application du filtre de Chebyshev et le lissage d'ordre 5.

Calcul des angles des vecteurs déplacement par rapport à l'horizontale.

De la même façon que nous avons utilisé les résultats du calcul des déplacements pour le calcul des vitesses, en calculant le module du vecteur qui a pour origine le centre de l'image et pour extrémité le maximum local de la fonction de transfert, nous pouvons utiliser les résultats du calcul des déplacements pour faire le calcul de l'angle de ce vecteur déplacement par rapport à l'horizontale. Ainsi nous pouvons arriver à faire une représentation des vitesses et des angles en coordonnées polaires. Sur cette représentation nous pouvons regarder s'il y a une orientation privilégiée, a priori envisageable pour maintenir la cohérence du mouvement de l'avalanche, ou si cette orientation n'existe pas. Dans le graphique suivant, figure 4-13, on présente la représentation en coordonnées polaires des vitesses et des angles pour l'avalanche de Mars 91. Les données ont été obtenues à partir de l'application du logiciel **PolarRep** de Matlab (voir annexe).

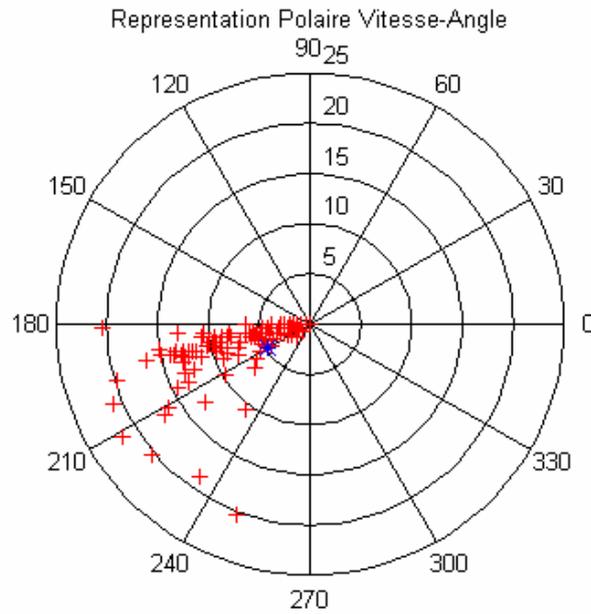


Figure 4-13. Représentation polaire Vitesse - Angle pour l'avalanche du 12 Mars 91.

On s'aperçoit qu'il y a, effectivement, une direction principale qui correspond à environ une inclinaison de 190° par rapport à l'horizontale (190° , figure 4-13). Il s'agit de la quantification d'une perception que nous avons notée en regardant les images vidéo. Ces directions correspondent presque avec la topographie du terrain où descend l'avalanche.

Si l'on fait l'histogramme des angles nous obtenons la figure 4-14. Les angles correspondants sont calculés comme $\alpha - 360^\circ$:

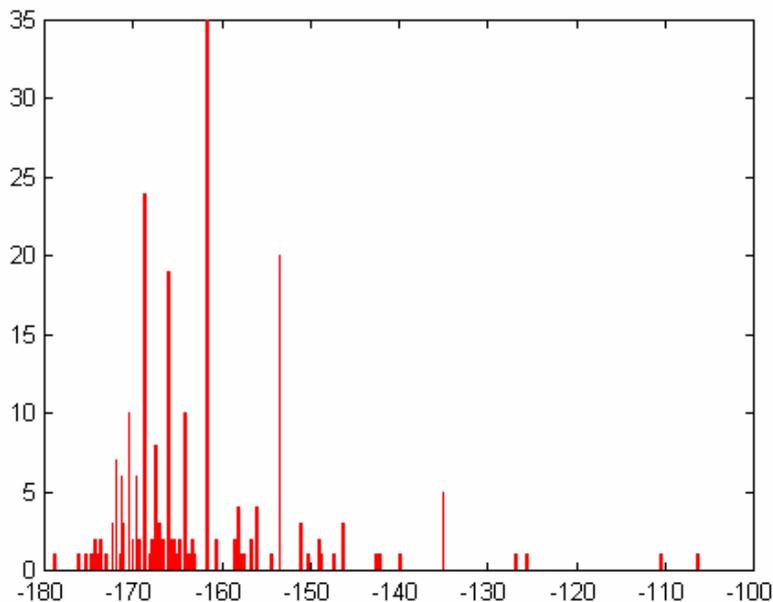


Figure 4-14. Histogramme des angles. Avalanche Mars 91.