

Comme nous avons déjà vu sur la représentation des coordonnées polaires, les angles sont concentrés entre 180 et 260 degrés. La moyenne est située à 190 degrés.

### Corrélation entre les graphiques des vitesses des sous-fenêtres.

À priori, dans un écoulement avalancheux dense on peut considérer une certaine cohérence des vitesses en surface à un instant donné. C'est à dire, il n'existe pas de grandes différences de vitesse entre deux parties différentes de l'avalanche au même instant. Alors, si l'on fait une étude des vitesses superficielles en zones distinctes au cours du temps et l'on fait la corrélation, les valeurs obtenues doivent être élevées; c'est à dire, proches à 1.

Par la suite, nous nous demandons s'il existe une relation entre les graphiques, c'est à dire, s'il y a une corrélation entre les résultats des vitesses des 30 sous-fenêtres, soit verticalement, soit horizontalement, à fin de vérifier les algorithmes appliqués. Si la corrélation est élevée, proche à 1, cela implique que les vitesses sont cohérentes. La disposition des sous-fenêtres de la zone étudiée de l'avalanche du 12 Mars 91 est la suivante (figure 4-15):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Figure 4-15. Disposition des 30 sous-fenêtres utilisées pour étudier l'avalanche de Mars 91.

Rappelons que les sous-fenêtres se superposent. Dans la figure 4-16, les sous-fenêtres 1, 2 et 16 y sont représentées.

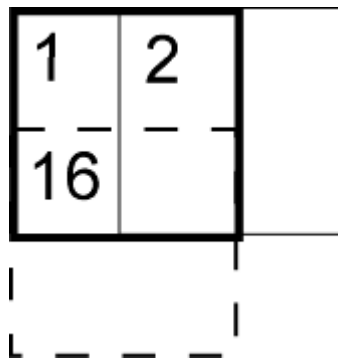


Figure 4-16. Représentation de la superposition des sous-fenêtres 1, 2 et 16. La largeur des sous-fenêtres est de 128 x 128 pixels et le déplacement de 8 pixels.

Nous présentons ici une série de corrélations qui ont été construites à l'aide du script `allau_mars91` (voir annexe).

Rappelons que la zone d'étude est couverte de 30 fenêtres distribuées en deux rangs de 15. Rappelons aussi que la taille de ces fenêtres est de 128 x 128 pixels et les déplacement entre deux fenêtres est de 8 pixels. Pour pouvoir établir les corrélations, nous avons choisi une fenêtre toutes les trois fenêtres dans le

premier rang, et une toutes les trois dans la deuxième. Nous avons choisi une fenêtre toutes les trois fenêtres pour avoir un recouvrement qui ne soit pas excessif à fin que le résultat ne soit pas masqué par la duplicité de l'information.

En horizontale, on montre le résultat de la corrélation entre les sous-fenêtres 3, 6, 9, 12, et 15 (première rangée dans la figure 4-15 et graphique des vitesses dans la figure 4-7). La matrice de corrélation correspondante se trouve dans le tableau 4-5.

	Fen. 3	Fen. 6	Fen. 9	Fen. 12	Fen. 15
Fen. 3	1.0000	0.8156	0.8291	0.8585	0.8080
Fen. 6		1.0000	0.7893	0.7762	0.7397
Fen. 9			1.0000	0.9015	0.8825
Fen. 12				1.0000	0.8741
Fen. 15					1.0000

Tableau 4-5. Matrice de corrélation horizontale entre les sous-fenêtres 3, 6, 9, 12, et 15.

On montre, à continuation, les résultats de la corrélation entre les sous-fenêtres 18, 21, 24, 27 et 30 (seconde ligne dans la figure 4-18). La matrice de corrélation correspondante se trouve dans le tableau 4-6.

	Fen. 18	Fen. 21	Fen. 24	Fen. 27	Fen. 30
Fen. 18	1.0000	0.8192	0.7489	0.7064	0.6589
Fen. 21		1.0000	0.7297	0.7910	0.7265
Fen. 24			1.0000	0.7156	0.7193
Fen. 27				1.0000	0.8618
Fen. 30					1.0000

Tableau 4-6. Matrice de corrélation horizontale entre les sous-fenêtres 18, 21, 24, 27, 30.

Les corrélations des graphiques dans le sens horizontal, sont assez élevées cela veut dire que les vitesses des différents fenêtres sont cohérents. On peut dire, donc, que ce résultat valide la méthodologie appliquée.

Tout de suite nous allons analyser les corrélations dans le sens vertical, des y. Dans ce cas là, puisque nous n'avons que deux rangs, la corrélation se fera entre deux fenêtres.

Nous présentons les résultats entre les couples des sous-fenêtres 3 et 18, 9 et 24, et, 15 et 30 pour traiter les corrélations verticales. (tableau 4-7 et tableau 4-8).

	Fen. 3	Fen. 18
Fen. 3	1.0000	0.8413
Fen. 18		1.0000

	Fen. 9	Fen. 24
Fen. 9	1.0000	0.8867
Fen. 24		1.0000

Tableau 4-7. Matrices résultat des corrélations verticales entre les sous-fenêtres 3 et 18, et 9 et 24.

	Fen. 15	Fen. 30
Fen. 15	1.0000	0.8054
Fen. 30		1.0000

Tableau 4-8. Matrices résultats des corrélations verticales entre les sous-fenêtres 15 et 30.

Nous pouvons dire que ces résultats indiquent une forte corrélation. Il existe deux causes pour ce fait, toute fois espéré, après avoir vu les résultats de la corrélation horizontale: pour commencer, le fait que les vitesses soient cohérentes, et par la suite, que la superposition des sous-fenêtres contribue à augmenter la corrélation.

### ***Avalanche du 15 Janvier 92***

Sur l'image 4-19 se présente un photogramme de l'avalanche du 15 Janvier 92. Nous pouvons reconnaître les zones d'applications de nos algorithmes.

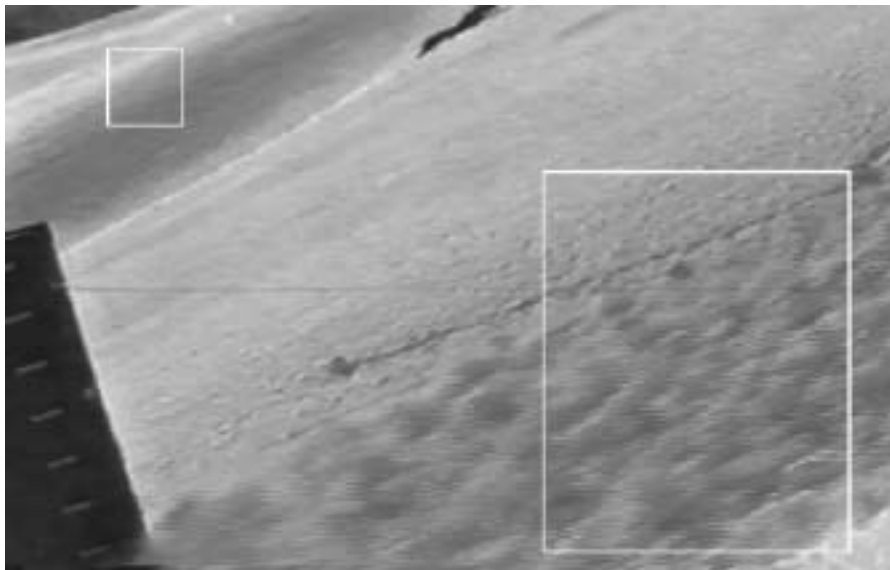


Image 4-19. Image, non-détramé, de l'avalanche du 15 Janvier 92. A gauche, en bas, un support de capteurs profilé en aile d'avion, en haut, fenêtré déterminant la portion de surface utilisée pour calculer la densité spectrale du bruit. A droite: fenêtré déterminant la portion de surface étudiée.

Sur l'image 4-20 nous pouvons voir 3 des 40 sous-fenêtres utilisées pour faire les calculs de la vitesse superficielle de l'avalanche du mois de Janvier 92.

Pour cette avalanche nous avons une zone d'étude de dimensions 368 x 80 pixels. La largeur des sous-fenêtres est de 64 x 64 pixels, et elles ont été déplacées de 16 pixels. Au total nous avons 40 sous-fenêtres pour calculer les vitesses. La répartition de ces 40 sous-fenêtres est de 20 points de mesure en horizontale et 2 en verticale (figures 4-27 et 4-28). Pour cette avalanche nous avons une série de 428 images.

Un étalonnage fait au niveau du support des capteurs, en bas à gauche de l'image 4-20, nous donne que 1 pixel est équivalent à 1,20 cm. Cette relation sera utilisée afin de faire une première approximation de la vitesse de l'avalanche.



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.

Nous montrons ensuite le résultat obtenu après application de l'algorithme à la série d'images correspondant à l'avalanche du 15 Janvier 92. Concrètement sur les figures 4-17 et 4-18 nous voyons représentés les résultats des sous-fenêtres no 1 et n<sub>o</sub> 40. Ces sous-fenêtres sont placées au coin droit en haut et au coin gauche en bas de la zone d'étude, image 4-20.

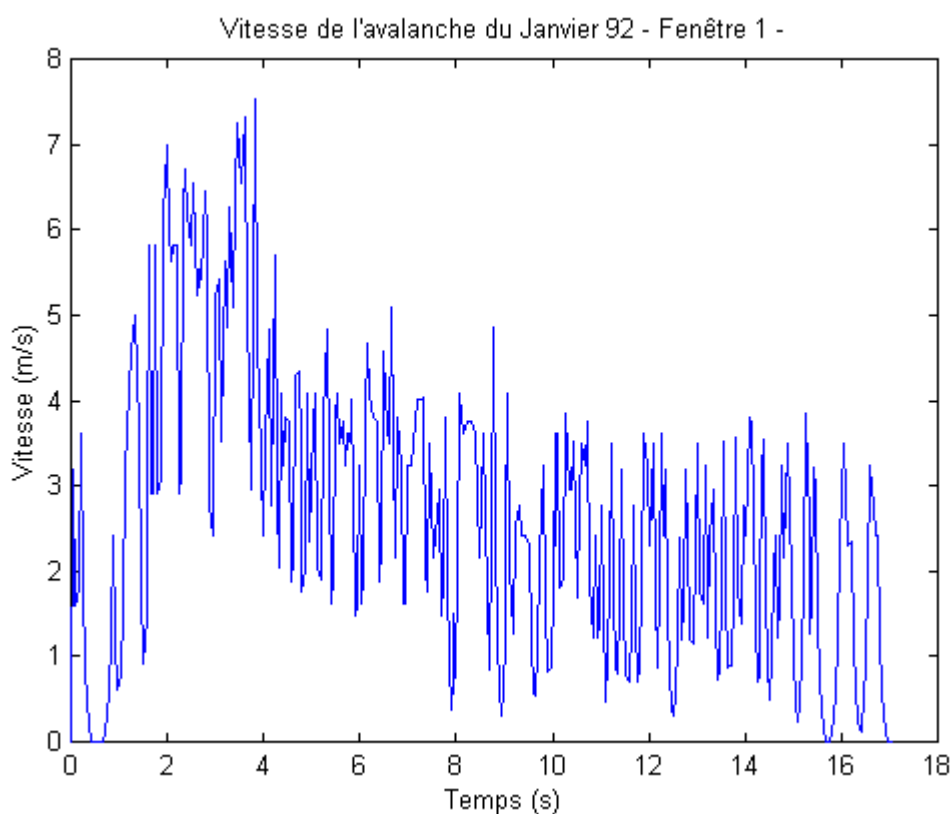


Figure 4-17. Vitesse de l'avalanche du 15 Janvier 92. Sous-fenêtre n<sub>o</sub> 1.

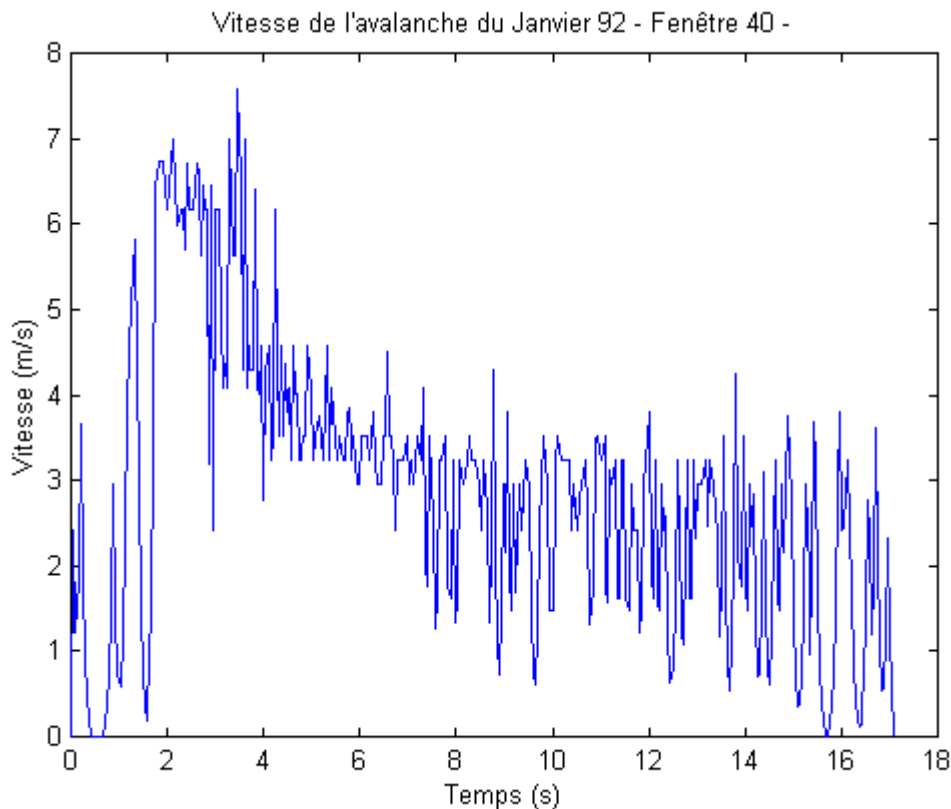


Figure 4-18. Vitesse de l'avalanche du 15 Janvier 92. Sous-fenêtre  $n_0$  40.

Les premiers pics que nous retrouvons sur les graphiques correspondent aux boules de neige qui arrivent avant le corps de l'avalanche. Les boules de neige passent par la zone d'étude à une vitesse autour de 4 m/s. Par ailleurs un nuage qui précède le corps de l'avalanche arrive à une vitesse d'entre 6 et 7 m/s, et la partie plus dense de l'avalanche arrive à une vitesse de 7 m/s pour ensuite décroître graduellement. Si pour cette image 1 pixel est équivalent à 1,20 cm, en faisant une première approche des erreurs commises, et puisque l'erreur minimum est d'un pixel, nous voyons que la vitesse minimale que l'algorithme peut mesurer est de 0,3 m/s. Ainsi l'indétermination de la vitesse pour l'avalanche de Janvier 92 est au moins de 0,3 m/s. Donc pour des vitesses de 10 m/s l'erreur minimum commise est de 3 %, pour des vitesses de 6 m/s de 5% et pour des vitesses d'environ 3 m/s l'erreur est de 10%.

Dans la figure 4-19 nous montrons les résultats de la vitesse obtenus en autres 12 points de la zone d'étude pour cette avalanche. Il s'agit des fenêtres 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32, 35 et 38.

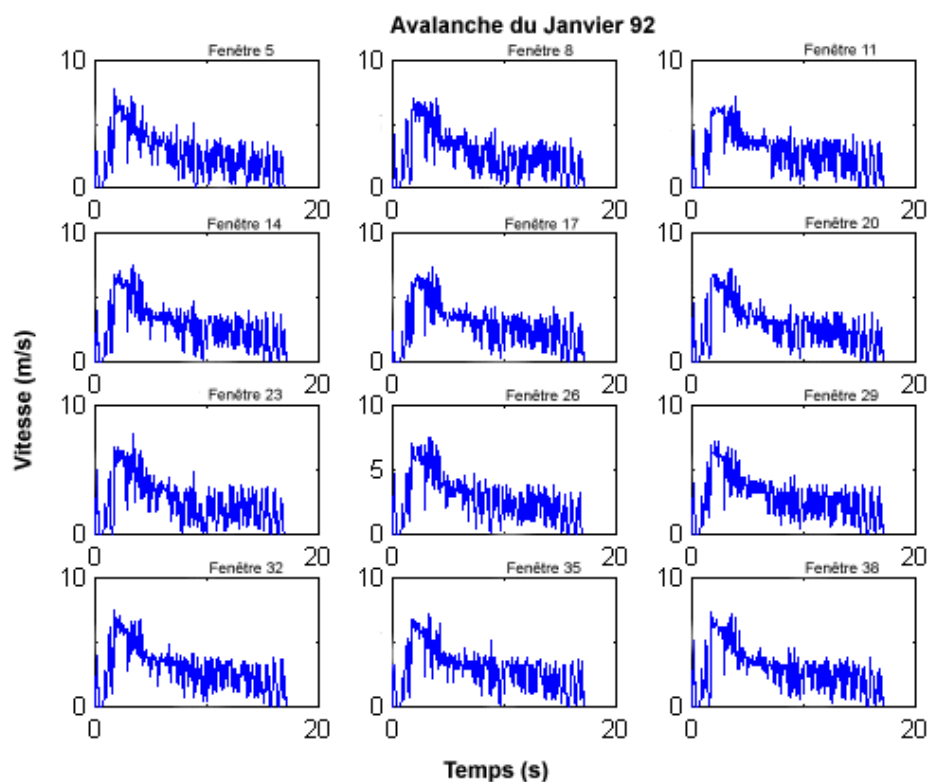


Figure 4-19. Vitesse de l'avalanche du 15 Janvier 92 correspondant aux sous-fenêtres 5, 8 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32, 35 et 38.

Nous présentons ensuite, figure 4-20, les résultats correspondants à la vitesse moyenne de l'avalanche du 15 Janvier 92 en fonction du temps. Pour cette avalanche la vitesse moyenne d'une image est obtenue à partir de la contribution des 40 fonctions de transfert de chaque image

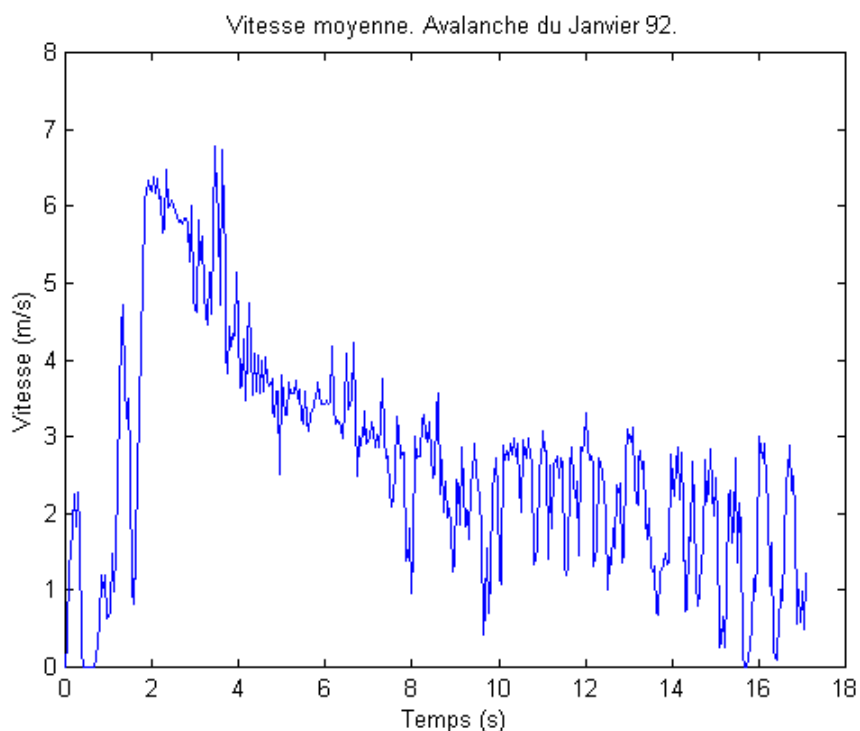


Figure 4-20. Vitesse moyenne de l'avalanche du 15 Janvier 92.

Sur la figure 4-20 on apprécie quatre zones. D'abord il y a deux pics de vitesse. Il s'agit de pics provoqués par l'arrivée de boules de neige avant l'arrivée du front de l'avalanche. En suite il y a le front de l'avalanche qui arrive à une vitesse moyenne d'autour 6 m/s. Après pendant le passage du corps la vitesse diminue lentement de 6m/s à 3 m/s. Finalement la queue fait sont passage pour la zone d'étude à une vitesse autour de 2 m/s.

Comme nous avons fait auparavant pour l'avalanche de Mars 91, nous filtrons le signal de la vitesse moyenne afin d'éliminer les hautes fréquences. Nous allons essayé, aussi, un filtre de Butterworth et un filtre de Chebyshev. Sur les figures 4-21 et 4-22 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 crée le script de Matlab **allau\_gener92** (voire annexe).

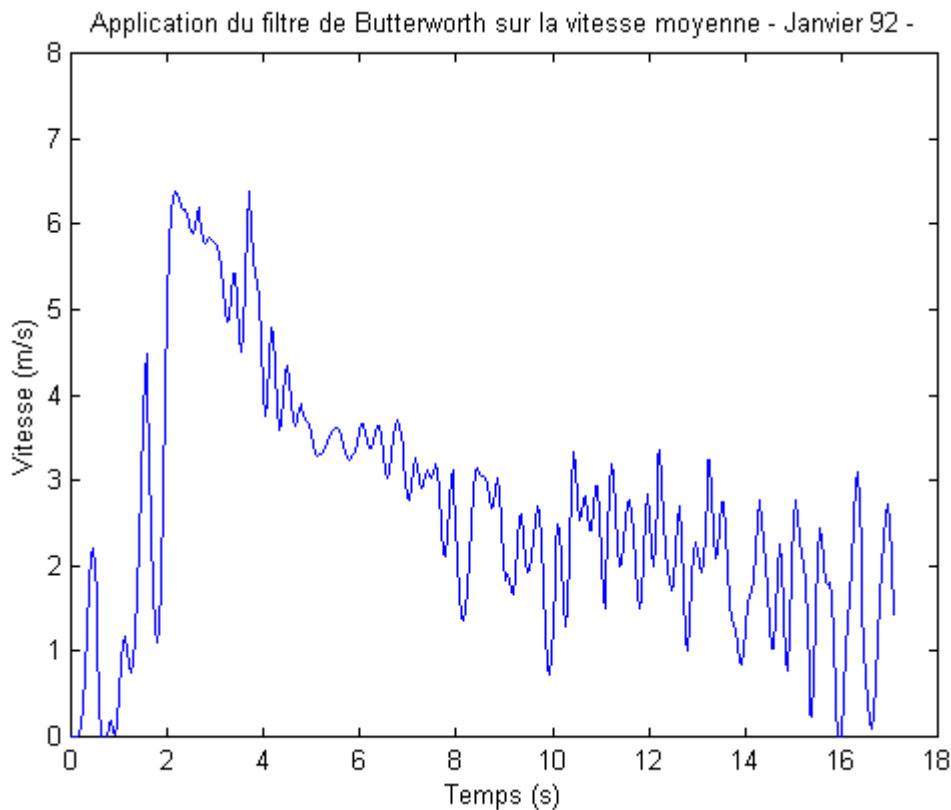


Figure 4-21. Vitesse moyenne de l'avalanche du 15 Janvier 92 après l'application du filtre de Butterworth.

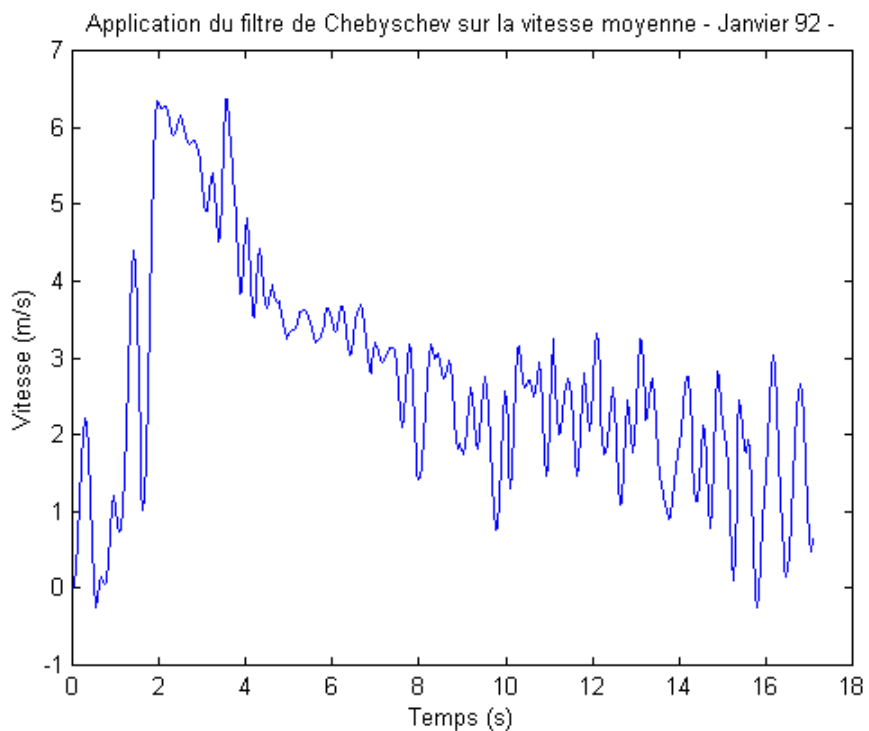


Figure 4-22. Vitesse moyenne de l'avalanche du 15 Janvier 92 après l'application du filtre de Chebyshev.

Dans la figure suivante, figure 4-23, on peut apprécier la graphique de la vitesse moyenne, et superposés les graphiques des résultats de l'application de deux filtres pour l'avalanche de Janvier 92.

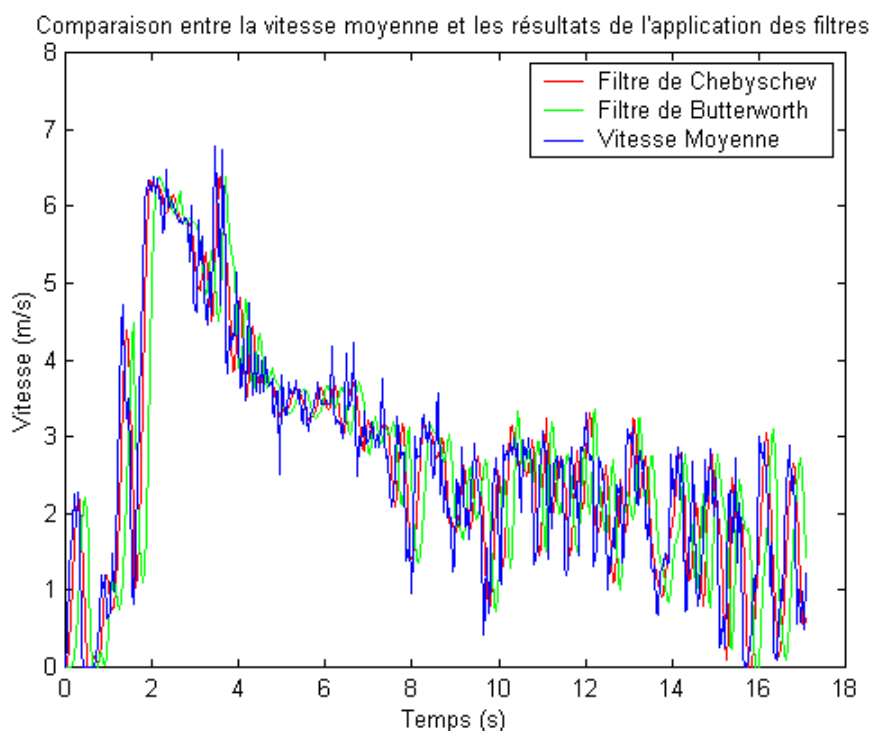


Figure 4-23. Superposition des signales correspondant à la vitesse moyenne de l'avalanche du 15 Janvier 92 et les résultats des applications des filtres de Butterworth et Chebyshev.



Dans ce cas aussi, les résultats de l'application du filtre de Chebyshev s'adaptent mieux que ceux de Butterwoth. Après le lissage d'ordre 5, sur les données obtenues après l'application du filtre de Chebyshev, nous obtenons une graphique plus douce pour l'avalanche du Janvier 92 (figure 4-24). Nous pouvons apprécier entre l'instant  $t=0$  et l'instant  $t=2$  s deux pics correspondants au passage de boules de neige avant l'arrivé du corps de l'écoulement. Les deux pics suivants, entre  $t=2$  et  $t=4$  s, sont attribués à l'arrivé du front en deux vagues. Pendant le corps de l'avalanche passe en face de la zone d'étude, la vitesse de l'écoulement descend doucement.

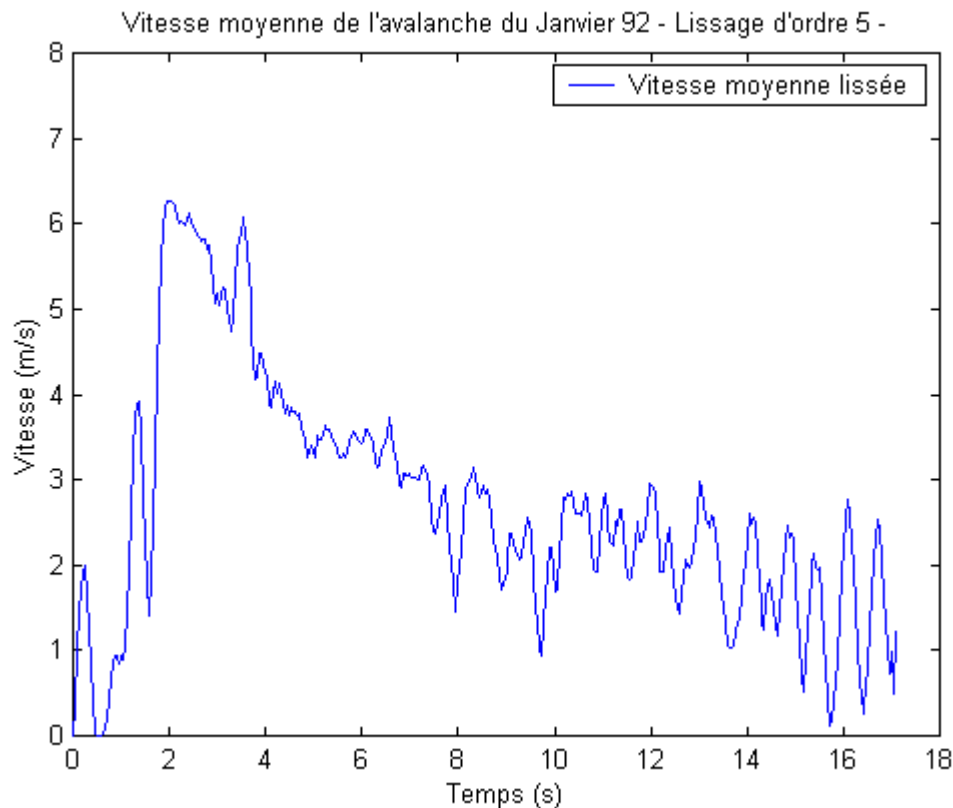


Figure 4-24. Vitesse moyenne de l'avalanche du 15 Janvier 92 après l'application du filtre de Chebyshev et le lissage d'ordre 5.

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

De la même façon qu'on avait fait la représentation en coordonnées polaires des vitesses et des angles pour l'avalanche de Mars 91, on fait maintenant une représentation similaire (figure 4-25) pour les données, vitesses et angles, de l'avalanche de Janvier 92. De nouveau nous pouvons observer que dans ce cas là il y a une direction privilégiée qui se trouve entre les 12 et les 15 degrés par rapport à l'horizontale comme on le voit dans la figure 4-26 (où on a l'histogramme des angles). Ces directions correspondent presque avec la topographie du terrain où descend l'avalanche.

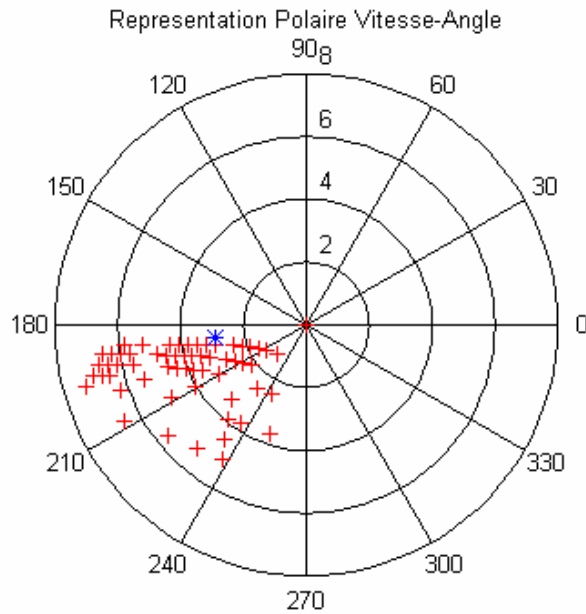


Figure 4-25. Représentation en coordonnées polaires des angles de l'avalanche du 15 Janvier 92.

Si l'on fait l'histogramme des angles nous obtenons la figure 4-26; où les angles correspondants sont calculés comme  $\alpha - 360^\circ$ : Dans la figure 4-26 les angles sont concentrés entre  $-180$  et  $-150$  degrés, c'est à dire entre 180 et 210 degrés par rapport à l'horizontale. La moyenne se trouve autour de 190 degrés. Cet à dire 10 degrés par dessous de l'horizontale dans le sens droite – gauche.

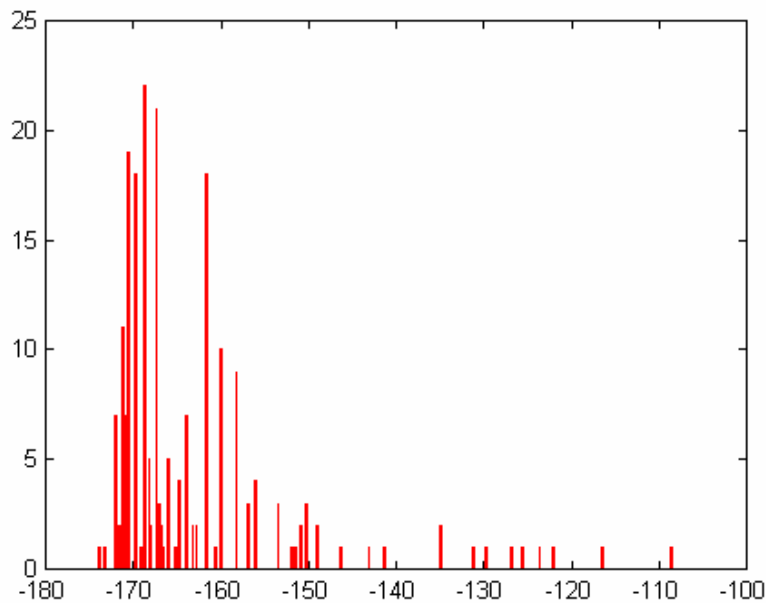


Figure 4-26. Histogramme des angles de l'avalanche du mois de Janvier 92.

**Corrélation entre les graphiques des vitesses des sous-fenêtres.**

La disposition des sous-fenêtres de la zone étudiée de l'avalanche du 12 janvier 92 est la suivante (figure 4-18):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40

Figure 4-27. Disposition des 40 fenêtres utilisées pour étudier l'avalanche de Janvier 92.

Dans la figure 4-19, la superposition des sous-fenêtres 1, 2 et 21 y est représenté.

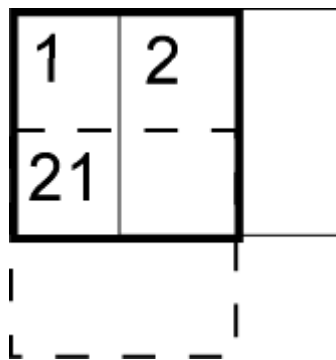


Figure 4-28. Représentation de la superposition des sous-fenêtres 1, 2 et 21. La largeur des sous-fenêtres est de 64 x 64 pixels et le déplacement de 16 pixels.

Nous présentons ici une série de corrélations qui ont été obtenues à l'aide du script **allau\_gener92** de Matlab (voir annexe).

En horizontale, nous montrons le résultat de la corrélation entre les sous-fenêtres 2, 5, 8, 11, 14, 17 et 20. Ces sous-fenêtres font partie de la première rangée dans la figure 4-27. Et, entre les sous-fenêtres 22, 25, 28, 31, 34, 37 et 40, seconde ligne dans la figure 4-27. Les matrices de corrélation correspondantes se trouvent dans les tableaux 4-9 et 4-10.

	Fen. 2	Fen. 5	Fen. 8	Fen. 11	Fen. 14	Fen. 17	Fen. 20
Fen. 2	1.0000	0.8012	0.7810	0.8085	0.8447	0.8152	0.8166
Fen. 5		1.0000	0.8047	0.8231	0.8611	0.8345	0.8729
Fen. 8			1.0000	0.8237	0.8403	0.8165	0.8542
Fen. 11				1.0000	0.8958	0.8613	0.8654
Fen. 14					1.0000	0.8728	0.9036
Fen. 17						1.0000	0.8901
Fen. 20							1.0000

Tableau 4-9. Matrice de corrélation horizontale entre les sous-fenêtres 2, 5, 8, 11, 14, 17 et 20.

	Fen. 22	Fen. 25	Fen. 28	Fen. 31	Fen. 34	Fen. 37	Fen. 40
Fen. 22	1.0000	0.7932	0.8132	0.8050	0.8260	0.8205	0.8333
Fen. 25		1.0000	0.8284	0.8170	0.8114	0.8698	0.8367
Fen. 28			1.0000	0.8653	0.8616	0.8717	0.8596
Fen. 31				1.0000	0.8524	0.8577	0.8420
Fen. 34					1.0000	0.8820	0.8944
Fen. 37						1.0000	0.8752
Fen. 40							1.0000

Tableau 4-10. Matrice de corrélation horizontale entre les sous-fenêtres 22, 25, 28, 31, 34, 37 et 40.

Ces résultats, tableaux 4-9 et 4-10, donnent aussi des corrélations élevées. Ceux-ci confirment et valident, donc, la méthodologie appliquée pour cette avalanche.

Nous présentons, en suite, les résultats des corrélations dans le sens vertical entre les couples des sous-fenêtres 2 et 22, 8 et 28, 14 et 34 et, 20 et 40 pour traiter les corrélations verticales. (tableau 4-11 et 4-12).

	Fen. 2	Fen. 22
Fen. 2	1.0000	0.8283
Fen. 22		1.0000

	Fen. 8	Fen. 28
Fen. 8	1.0000	0.8652
Fen. 28		1.0000

Tableau 4-11. Matrices résultat des corrélations verticales entre les sous-fenêtres 2 et 22, et 8 et 28.

	Fen. 14	Fen. 34
Fen. 14	1.0000	0.9060
Fen. 34		1.0000

	Fen. 20	Fen. 40
Fen. 20	1.0000	0.9008
Fen. 40		1.0000

Tableau 4-12. Matrices résultats des corrélations verticales entre les sous-fenêtres 14 et 34, et 20 et 40.

À la vue de ces résultats nous pouvons dire que également que l'avalanche de Mars 91 les vitesses sont cohérents et que la superposition des sous-fenêtres contribue à augmenter la corrélation.

### **Avalanche du 10 Avril 92**

Sur l'image 4-17 nous présentons un photogramme, non-détramé, de l'écoulement avalancheux du 10 Avril 92. Dans l'image, à droite, on observe la zone d'étude du champ de vitesses, à gauche, en bas le support de capteurs et, en haut, la fenêtre utilisée pour obtenir la densité spectrale du bruit.

L'aire d'étude pour cette troisième avalanche est de 240 x 136 pixels. La largeur des sous-fenêtres, due à sa vitesse, est de 128 x 128 pixels, et le déplacement est de 8 pixels. Nous obtenons 30 fenêtres, 15 dans le sens horizontal, et 2 dans le sens vertical (figures 4-35 et 4-36). Cette avalanche a été la plus longue des 3 étudiées et on a une série de 531 images.

Dans ce cas là, la relation entre pixels et centimètres étalonnée au niveau de support des capteurs nous donne que 1 pixel est équivalent à 1,16 cm. Cela implique, si l'on considère, comme dans les autres cas, que l'erreur minimum est d'1 pixel, que la vitesse présente un pas minimum de 0,29 m/s. L'erreur pour une vitesse de 15 m/s est 1,9 %, pour 8 m/s il est de 3,6 %, et pour des vitesses de 2 m/s, l'erreur monte jusqu'à 14.5%.

Les figures 4-29 et 4-30 nous montrent les résultats obtenus pour les sous-fenêtre  $n_0$  1 et  $n_0$  30. On peut apprécier un augment de la vitesse vers la fin de l'écoulement du à une petite coulée qui arrive après de corps de l'avalanche.

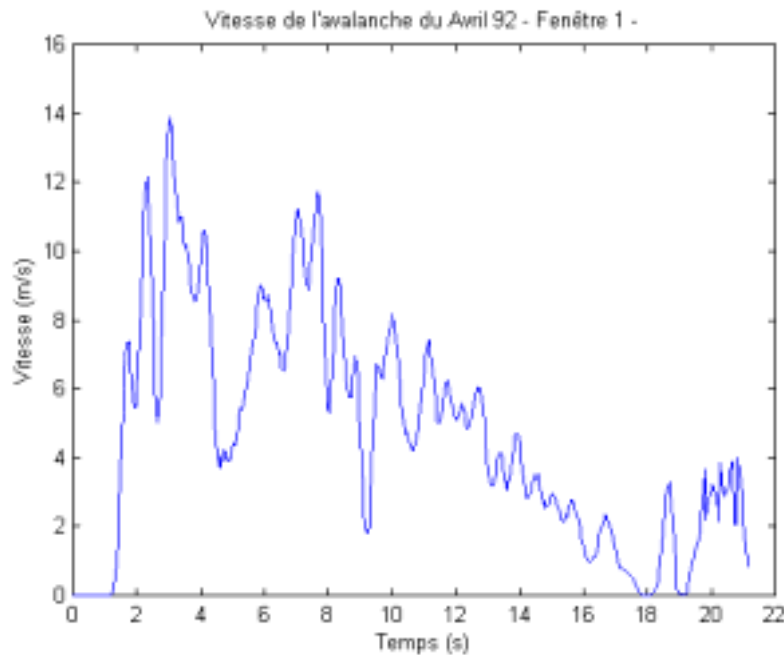


Figure 4-29. Vitesse de l'avalanche du 10 Avril 92. Fenêtre 1.

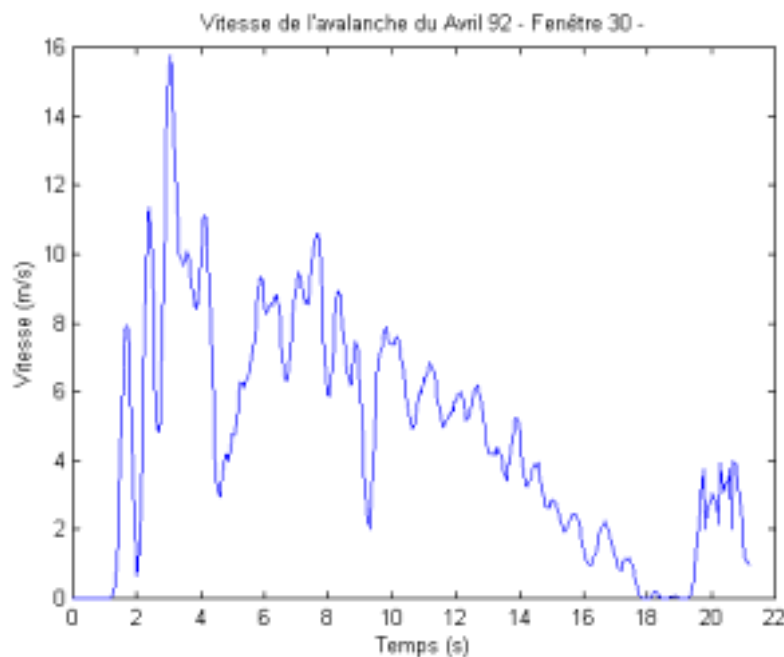


Figure 4-30. Vitesse de l'avalanche du 10 Avril 92. Fenêtre 30.

Dans la figure 4-31 nous montrons les résultats obtenus pour les fenêtres 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, et 27.

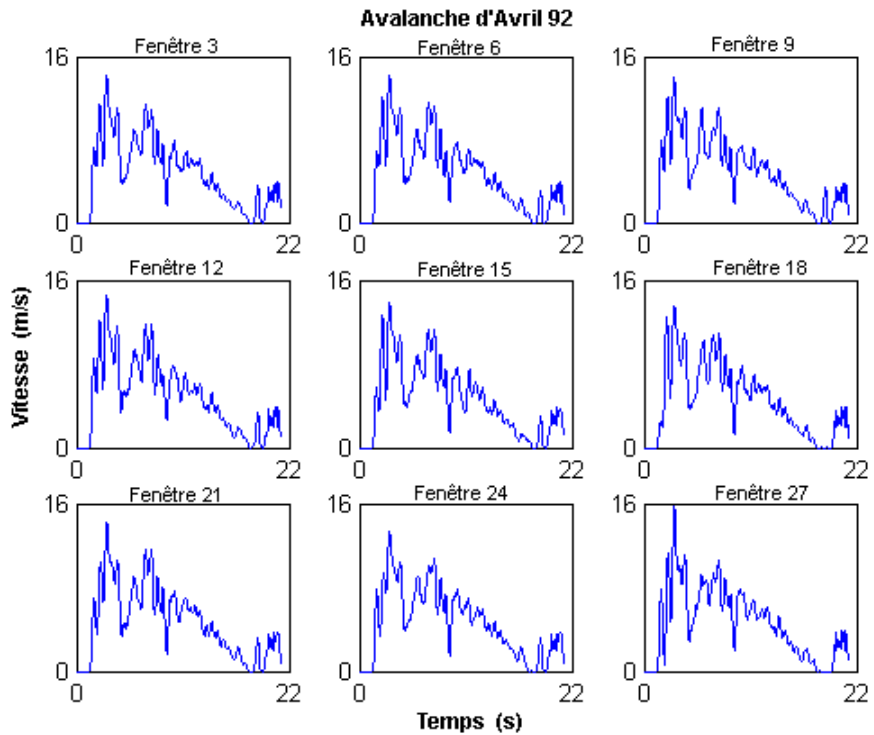


Figure 4-31. Vitesse de l'avalanche du 10 Avril 92 correspondant aux fenêtres 3, 6 9, 12, 15, 18, 21, 24 et 27.

Dans la figure 4-32 nous présentons les résultats correspondants à la vitesse moyenne de l'avalanche du 10 Avril 92. La vitesse moyenne d'une image a été obtenue à partir de la contribution des 30 fonctions de transfert de chaque image

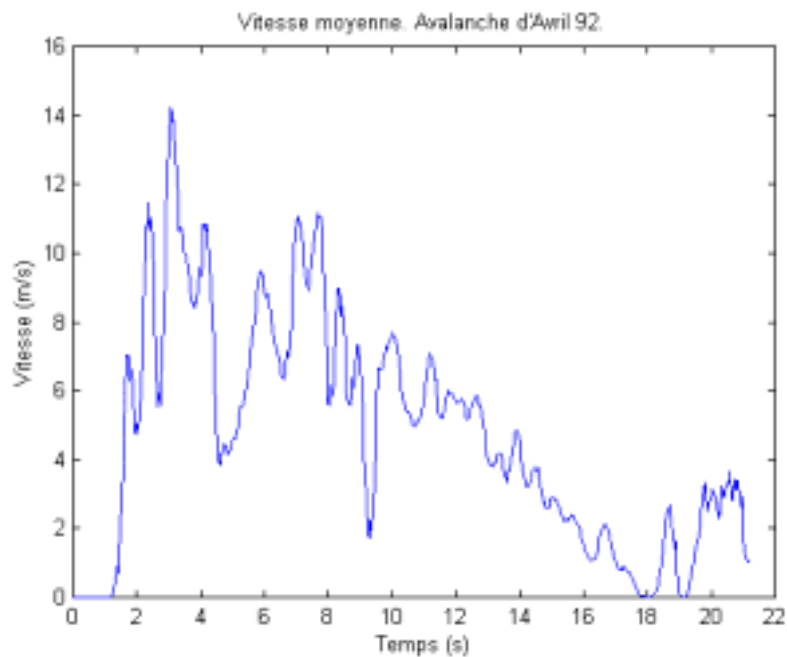


Figure 4-32. Vitesse moyenne de l'avalanche du mois d'Avril 92.

Sur la figure 4-32 on peut observer l'évolution de la vitesse au cours du temps pour l'avalanche du mois d'Avril 92. D'abord il y a le front de l'avalanche qui arrive en deux vagues, la première à une vitesse d'autour 14 m/s et la seconde à une vitesse autour d'11 m/s. Après pendant le passage du corps et jusqu'à le passage de la queue la vitesse diminue lentement de 10 m/s jusqu'à sont arrêt. Finalement il y a une petite coulée qui arrive à une vitesse autour de 4 m/s.

Dans la figure 4-32 on observe qu'il n'y a pas des hautes fréquences, donc, il n'est pas nécessaire de filtrer les vitesses comme nous avons fait auparavant pour les avalanches de Mars 91 et Janvier 92.

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

De la même façon qu'on avait fait la représentation en coordonnées polaires des vitesses et des angles pour les avalanches de Mars 91 et Janvier 92, on fait maintenant une représentation similaire (figure 4-33) pour les données, vitesses et angles, de l'avalanche d'Avril 92.

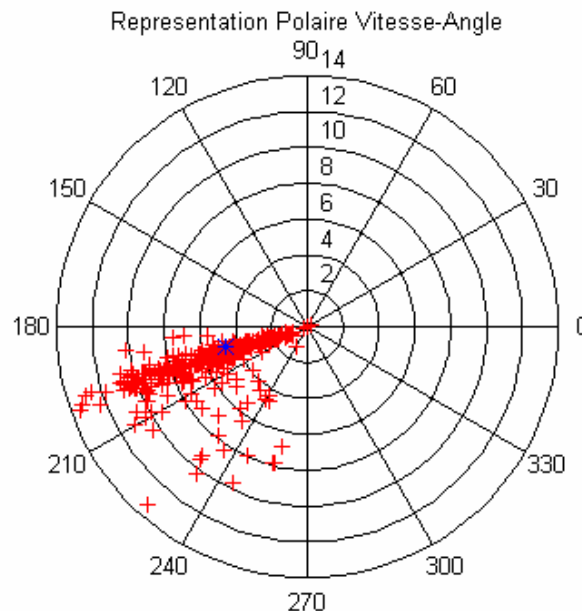


Figure 4-33. Représentation en coordonnées polaires. Vitesses en m/s et l'angle par rapport à l'horizontale du terrain. Avalanche du 10 Avril 1992.

Dans la figure 4-33 on aperçoit très clairement une direction privilégiée. Celle-ci est représentée entre 190 et 215 degrés. Si l'on fait l'histogramme des angles nous obtenons la figure 4-34; où les angles correspondants sont calculés comme  $\alpha - 360^\circ$ : Dans la figure 4-34 les angles sont concentrés entre  $-170$  et  $-155$  degrés, c'est à dire entre 190 et 215 degrés par rapport à l'horizontale. La moyenne se trouve autour de 195 degrés. C'est à dire 15 degrés par dessous de l'horizontale dans le sens droite – gauche.

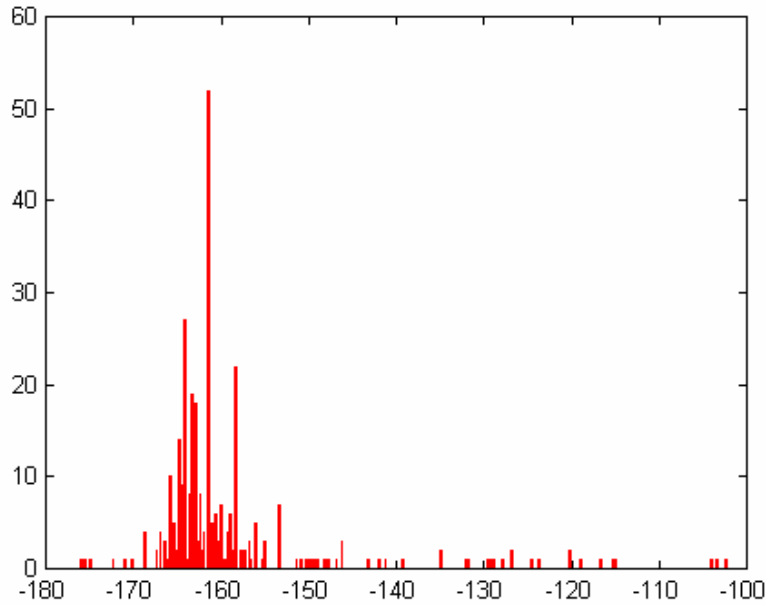


Figure 4-34. Histogramme des angles de l'avalanche d'Avril 1992.

**Corrélation entre les graphiques des vitesses des sous-fenêtres.**

La disposition des sous-fenêtres de la zone étudiée de l'avalanche du 10 Avril 92 est similaire à la disposition des fenêtres pour l'avalanche de Mars 91 (figure 4-35):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Figure 4-35. Disposition des 30 fenêtres utilisées pour étudier l'avalanche d'Avril 92.

Rappelons que les sous-fenêtres se superposent. Dans la figure 4-36 y sont représentées les sous-fenêtres 1, 2 et 16.

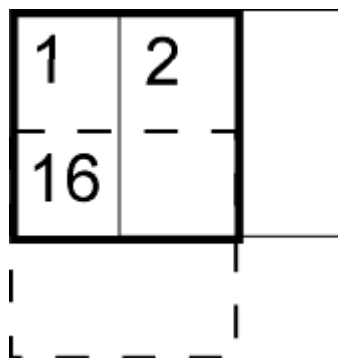


Figure 4-36. Représentation de la superposition des sous-fenêtres 1, 2 et 16. La largeur des sous-fenêtres est de 128 x 128 pixels et le déplacement de 8 pixels.

Nous présentons ici une série de corrélations qui ont été construites à l'aide du script `allau_abril92` de Matlab (voir annexe).



En horizontale, on montre l'étude de la corrélation entre les sous-fenêtres 3, 6, 9, 12, et 15 (première rangée dans la figure 4-35 et graphique des vitesses dans la figure 4-36). La matrice de corrélation correspondante se trouve dans le tableau 4-13.

	Fen. 3	Fen. 6	Fen. 9	Fen. 12	Fen. 15
Fen. 3	1.0000	0.9930	0.9929	0.9854	0.9865
Fen. 6		1.0000	0.9968	0.9883	0.9915
Fen. 9			1.0000	0.9887	0.9909
Fen. 12				1.0000	0.9861
Fen. 15					1.0000

Tableau 4-13. Matrice de corrélation horizontale entre les sous-fenêtres 3, 6, 9, 12 et 15.

Aussi en horizontale, entre les sous-fenêtres 19, 22, 25, 28, 31 et 34 (seconde ligne dans la figure 4-35). La matrice de corrélation correspondante se trouve dans le tableau 4-14.

	Fen. 18	Fen. 21	Fen. 24	Fen. 27	Fen. 30
Fen. 18	1.0000	0.9788	0.9749	0.9653	0.9551
Fen. 21		1.0000	0.9558	0.9465	0.9422
Fen. 24			1.0000	0.9922	0.9742
Fen. 27				1.0000	0.9759
Fen. 30					1.0000

Tableau 4-14. Matrice de corrélation horizontale entre les sous-fenêtres 18, 21, 24, 27 et 30.

Nous présentons les résultats des corrélations dans le sens vertical, des y. La corrélation a été étudiée entre les couples des sous-fenêtres 3 et 18, 9 et 24 et 15 et 30 (tableau 4-15 et tableau 4-16).

	Fen. 3	Fen. 18
Fen. 3	1.0000	0.9889
Fen. 18		1.0000

	Fen. 9	Fen. 24
Fen. 9	1.0000	0.9853
Fen. 24		1.0000

Tableau 4-15. Matrices résultat des corrélations verticales entre les sous-fenêtres 3 et 18, et 9 et 24.

	Fen. 15	Fen. 30
Fen. 15	1.0000	0.9651
Fen. 30		1.0000

Tableau 4-16. Matrices résultats des corrélations verticales entre les sous-fenêtres 15 et 30.

Encore une troisième fois nous pouvons affirmer que ces résultats indiquent une forte corrélation à cause des vitesses qui sont cohérents et à la superposition des sous-fenêtres.

### 4.2.5 Calcul de la hauteur de l'avalanche.

Pour faire les calculs de la hauteur de l'avalanche il nous faut la présence de la totalité du support des capteurs dans l'image. Des trois avalanches que nous avons à notre disposition seulement l'avalanche du mois de Mars 91 accompli cet prémisses.

Nous présentons les calculs de la hauteur de l'avalanche du mois de Mars 1991.

On a appliqué les techniques du traitement d'images pour calculer la hauteur d'une avalanche de neige en un point donné, au cours du temps. Ces techniques seront expliqués dans ce paragraphe. Pour cela on considère l'étrave qui se trouve en position perpendiculaire a l'axe de la caméra vidéo comme un rectangle (image 4-21). On a donc :

$$S = b \cdot h \qquad \text{Eq. 4-11}$$

S : Surface de l'étrave (support des capteurs profilé en aile d'avion).  
b : Longueur de la base de l'étrave.  
h : Hauteur de l'étrave.



Image 4-21. Avalanche du 12 Mars 91. On peut observer l'étrave utilisée pour le calcul de la hauteur de l'avalanche.

Si l'on considère la zone correspondant à l'étrave en noir, et la zone correspondant à l'avalanche en blanc (image 4-22), on peut obtenir les fluctuations de la hauteur par rapport aux fluctuations de l'aire de l'étrave (fluctuations au cours du temps du nombre de pixels en noir).

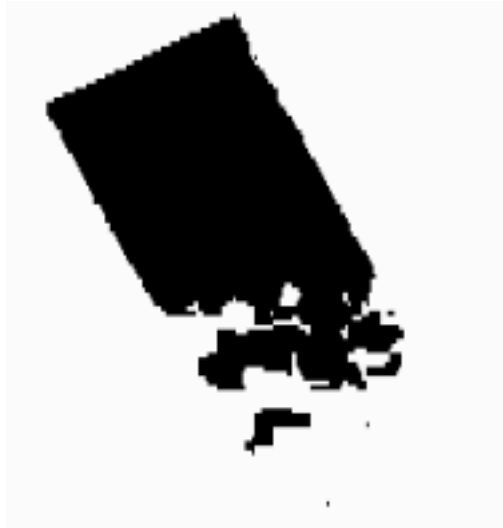


Image 4-22. Image correspondant à l'aile binarisée. En noir l'étrave. En blanc la zone correspondant à l'avalanche.

Pour l'avalanche du 12 Mars 1991, la durée de passage de l'avalanche au niveau du support des capteurs est de 10 s. Nous avons au total une série d'environ 250 images à traiter.

Pour cette avalanche on connaît :

$b(\text{cm}) = 156.6 \text{ cm}$ . Mesure réel de la base de l'étrave.

$b(\text{pixels}) = 93.9 \text{ pixels}$ . Mesure prise sur l'image 4-21.

Nous obtenons donc, que 1 pixel de l'image est équivalent à 1.667 cm dans l'espace réel.

Le résultat des mesures de la hauteur est donné par la figure 4-37.

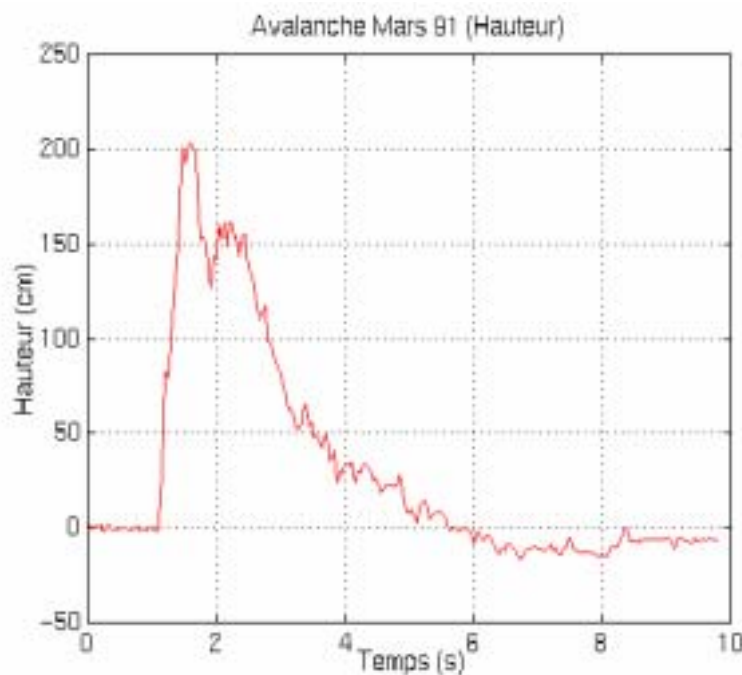


Figure 4-37. Variation de la hauteur de neige (cm) au cours du temps (s) de l'avalanche du 12 Mars 1991, au passage du support des capteurs.

Ce graphique (figure 4-37) nous montre qu'au moment du passage de l'avalanche de Mars 1991 au niveau du support des capteurs, le niveau de la neige augmente à deux mètres par rapport au manteau neigeux. Après, elle descend autour de 140 cm et remonte jusqu'à 160 cm. Une étude minutieuse de la bande vidéo nous montre qu'il y a deux vagues de neige au front de l'avalanche, et cela explique les deux pics du graphique de hauteur. Après, la hauteur descend doucement en dessous du niveau zéro du manteau neigeux avant le passage de l'avalanche. Cela confirme l'hypothèse que dans les avalanches de neige dense, il existe une reprise de neige.

Maintenant regardons s'il existe une corrélation entre le graphique de hauteur de neige, en fonction du temps, et le graphique de vitesse. Nous avons créé le script de Matlab `allau_mars91` (en annexe) pour mesurer cette corrélation. Dans la figure 4-38, nous présentons les graphiques de hauteur de l'avalanche et de sa vitesse moyenne. Pour mieux visualiser cette figure, on a normalisée les valeurs au maximum, de façon qu'on puisse apprécier s'il existe des similitudes ou pas.

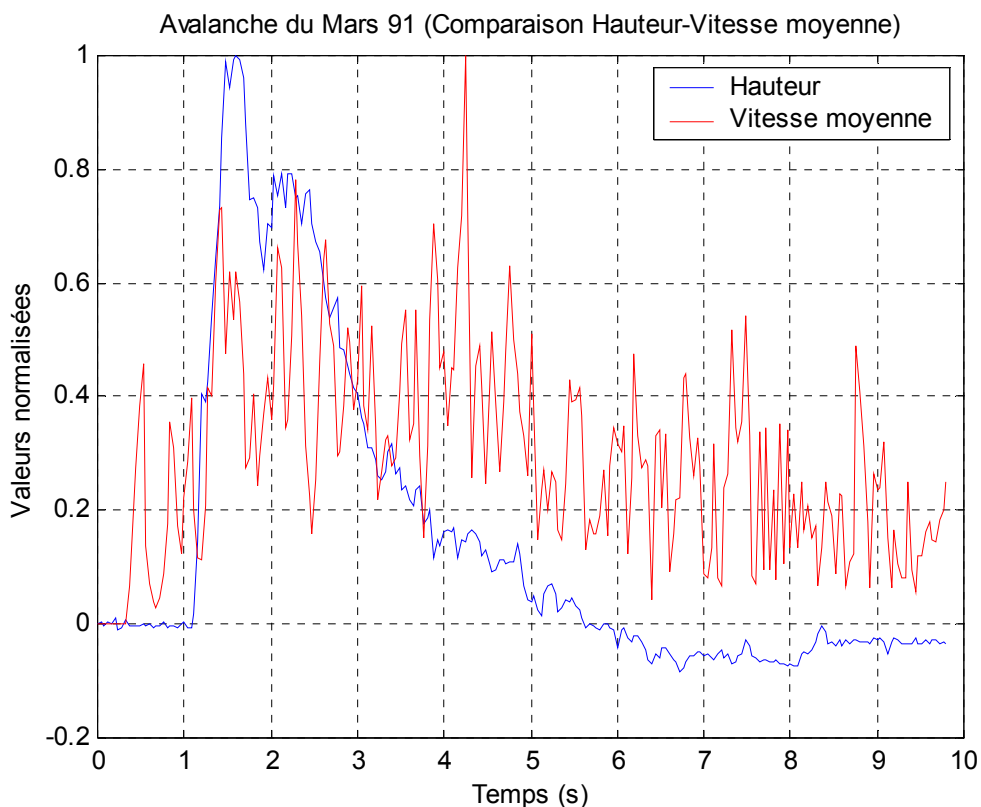


Figure 4-38. Représentations de la hauteur et la vitesse moyenne. Les données ont été "normalisées".

En observant la figure 4-38 nous constatons une certaine similitude entre les graphiques de la hauteur et de la vitesse moyenne. Au début, les deux augmentent rapidement et présentent deux pics qui signifient l'arrivée des deux vagues présentes dans le front de l'avalanche. Ultérieurement les deux graphiques descendent, même si celle de la hauteur le fait plus rapidement. Visuellement, la relation initiale entre la hauteur de la neige et la vitesse de

l'écoulement paraît évidente même si, à posteriori cette relation se fait moins évidente.

Numériquement, la corrélation entre les valeurs normalisées de la hauteur de l'avalanche et la vitesse moyenne et les résultats de l'avalanche du 12 Mars 1991 nous donne (tableau 4-17):

	Hauteur	Vitesse Moyenne
Hauteur	1.0000	0.5196
Vitesse Moyenne		1.0000

Tableau 4-17. Corrélation entre la hauteur de l'avalanche et la vitesse moyenne.

D'après ces résultats, il existe une légère corrélation, mais nous ne pouvons pas en conclure que les variables hauteur et vitesse ont un rapport évident. Il faudra prouver ces relations en plusieurs cas pour voir si on peut arriver à tirer des conclusions.

#### 4.2.6 Erreurs et validation des résultats.

Le calcul des erreurs inhérentes aux techniques de traitement d'images est très difficile à faire. Nous nous guidons par la qualité et la pureté des images qui sont le résultat de l'application de l'algorithme de calcul des fonctions de transfert. Si nous avons deux images du même phénomène à deux instants différents, l'algorithme que nous utilisons ne nous donne pas toujours une réponse précise (un seul point), mais un nuage de points un peu plus dispersés.

Une erreur que l'on peut quantifier facilement est celle liée à la précision du logiciel. Les résultats sont donnés à un pixel près. Il faut rappeler que ces résultats sont fonction de l'étalonnage et celui-ci est très approximatif. Nous avons déjà traité ce problème dans les trois avalanches précédentes. Cette erreur est difficile à réduire étant donné qu'elle dépend de la vitesse et de la largeur de l'avalanche par rapport à l'image globale. Dans notre cas, la position de la caméra et la présence de l'avalanche dans le scénario décrit, sont pratiquement les mêmes, mais les vitesses des trois avalanches sont différentes, et c'est cela qui détermine l'erreur pour chacune des avalanches.

Les résultats ont été vérifiés pour chacune des avalanches. Un moyen qui nous permet de connaître si les résultats sont cohérents ou pas, se base sur les vérifications réalisées manuellement à l'écran, suivi d'une partie connue de l'avalanche entre deux images consécutives.

## 4.3 Conclusion.

De nombreuses méthodes ont été mises en oeuvre pour effectuer des mesures de vitesses à partir d'une séquence d'images. Le plus souvent l'étude du corrélogramme entre des images successives permet une première approche des champs de vitesse. Cependant cette méthode n'est adaptée qu'à des images qui présentent des contrastes importants et des contours peu déformables. L'utilisation de traceurs permet de traiter le cas des contours déformables ou peu nets, mais cette solution n'est pas applicable dans notre cas. Le traitement que nous avons abordé consiste à effectuer une analyse par petites plages dans lesquelles la vitesse du milieu est uniforme.

Nous avons mis au point une méthode de traitement des séquences d'images vidéo sur des avalanches de neige dense qui permet d'obtenir une estimation rapide du champ des vitesses à la surface de l'écoulement. Ce résultat permet de comparer les résultats théoriques et expérimentaux et par la suite affiner les modèles numériques de prévision des risques.

Par la suite, nous ferons un commentaire à propos de la différence entre l'étude spatiale et l'étude temporelle. Comme nous avons avancé, nous utilisons souvent cette nomenclature.

La principale différence est que, d'après l'étude spatiale, le déplacement des fenêtres étudiées est très mince, d'environ 4 à 8 pixels selon le cas. Cela veut dire que selon la grandeur de la zone d'étude, nous arrivons à obtenir des réseaux de 224, 533 et 1000 points conformément à l'avalanche (voire tableau 4-3) d'où on pourra extraire des données de vitesse. C'est parce que cette densité de points du réseau répartis spatialement que l'on l'appellera étude spatiale.

Pour l'étude temporelle, ce que nous tenons en compte c'est d'avoir de l'information pendant la durée de l'avalanche. Dans ce cas là, le déplacement des fenêtres d'étude est plus grand, environ 16 pixels. Cela veut dire que si la grandeur de la zone d'étude s'agrandit, nous arrivons à obtenir des réseaux d'une trentaine de points de laquelle on obtiendra des données de la vitesse. Ainsi donc, nous avons des informations uniquement d'une trentaine de points dans la zone d'étude, mais nous avons aussi des séries de 223, 409 et 531 images lesquelles pourraient couvrir toute l'avalanche. Dans ce cas là nous donnons la préférence au facteur temps face au facteur espace, et c'est pour ça qu'on nomme l'étude temporelle.

En relation aux méthodes spatiales utilisées, nous croyons que certaines de ces méthodes, comme le classique flot optique, ne s'adaptent pas aux particularités de nos images. Parmi les méthodes fréquentielles, celle qui s'adapte le plus à nos besoins est la méthode adaptative. De toute façon, il y a encore du travail à faire pour améliorer cette méthode, surtout en relation au critère de seuillage pour pouvoir décider s'il y a eu ou non du mouvement. De cette façon il serait possible de développer une "interface" solide et facilement utilisable qui puisse nous donner une carte de vitesses à partir d'un film vidéo. Cette "interface" pourrait être utilisée par la communauté qui travaille dans l'étude de la dynamique des

avalanches. Tout cela passe pour faire une application de cette méthodologie à un plus grand nombre d'avalanches.

En général, les résultats des courbes de vitesses des trois avalanches étudiées, en utilisant la méthode adaptative, s'adaptent beaucoup aux courbes présentées par Gubler (1987) ou Marco (1994). Ces courbes déterminent la présence d'un front de l'avalanche à une vitesse déterminée, un corps où la vitesse descend graduellement, et une queue où la vitesse descend jusqu'à zéro.

On constate aussi que, dans la zone d'étude qui correspond à une zone canalisée, la carte de vitesses superficielles est, comme on l'avait prévu, très uniforme. Nous observons des vitesses plus grandes au centre du canal que sur les extrémités, même si nous avons un défaut de profondeur de champ dû au fait que nous travaillons en 2D.





## 5 Autres méthodes d'étude des avalanches: estimation de la variation de l'enveloppe d'une avalanche.

L'étude que nous présentons à continuation consiste à établir un algorithme permettant de suivre l'évolution du contour d'une avalanche sur une séquence d'un film vidéo. Nous avons pour objectif la détermination et l'analyse de la variation de l'enveloppe d'une avalanche de neige. Cette étude et l'étude présentée dans le chapitre 4 sont différentes en termes de traitement d'images. En effet, dans le chapitre 4 l'étude était basée sur des méthodes de corrélation d'images, alors que dans ce chapitre l'étude est basée sur des méthodes de contours déformables, en considérant une avalanche de neige comme un objet déformable au cours du temps.

L'utilisation de méthodes de contours déformables pour extraire les éléments intéressants des images fut introduit par Kass (1987) et Terzopoulos (1987). Ces modèles utilisent l'information de l'image, des niveaux de gris ou de l'intensité des pixels, et ils prennent en considération un modèle de déformation.

Différentes investigations ont été menées, jusqu'à aujourd'hui, afin de poursuivre la trace d'un objet déformable au cours d'une séquence. Ces travaux diffèrent les uns des autres par les différentes expressions mathématiques de l'information de l'image ou du modèle de déformation.

Plusieurs approches sont envisageables pour suivre le mouvement d'un objet déformable comme une avalanche. On peut les séparer en deux classes :

- celles basées sur un approche région (Bascle, 1994; Kervrann, 1995 et Maurizot, 1995).
- celles basées sur les frontières ou contours (Fayolle, 1995).

On peut aussi les classer suivant le principe utilisé pour quantifier le mouvement :

- le flot optique (Kervrann, 1995 et Maurizot, 1995).
- l'intercorrélacion directe ou fréquentielle (Bascle, 1994 et Fayolle, 1995).

La caractéristique de l'avalanche la plus riche en information, variations des niveaux de gris, sur une image est son contour. Par contour on entend la limite de la projection de l'enveloppe 3D de l'avalanche ainsi que des ombres qu'elle engendre sur le plan image. Nous nous sommes donc orienté vers la détection du contour ou *snakes*.

Il est impossible de séparer le contour réel de l'avalanche de l'ombre engendrée par le volume que représente l'avalanche. En effet l'enveloppe de l'avalanche

projette des ombres à la fois sur l'avalanche et sur le champ de neige. Certaines ombres au bord de l'avalanche peuvent appartenir à celle-ci, d'autres ne pas lui appartenir.

On commettra donc l'erreur d'englober les ombres de l'avalanche dans le contour. L'erreur en terme de surface reste faible. Par contre, l'erreur de position peut être non négligeable. Notamment si le suivi a pour objet la mesure d'une vitesse en un point du contour. L'ombre en effet se développe parfois plus vite que l'avalanche elle-même.

Quelques soient les méthodes utilisées pour résoudre le problème du suivi, il est nécessaire de disposer d'une image où l'on puisse distinguer le plus nettement possible l'avalanche du reste du champ de neige. La méthode utilisée pour disposer de cette image consiste en une différence entre une image de référence avant la présence de l'avalanche et une image contenant l'avalanche où le contour doit être détecté.

Dans ce chapitre une méthode qui utilise les contours actifs pour étudier le mouvement du front des avalanches de neige est présenté. Cette méthode considère les caractéristiques de l'avalanche et la nature des images. La principale difficulté, comme nous l'avons déjà signalé au chapitre 4, est due à la nature des images. Les images ont été prises en conditions réelles, nous travaillons au extérieur avec des conditions atmosphériques pas contrôlables, c'est à dire, sans optimisation de la lumière, ni de la distance de la caméra à l'objet, dans notre cas l'avalanche, etc.

## **5.1 Détection de la zone de l'avalanche par différence d'images.**

L'idée la plus simple lorsque l'on veut détecter un objet en mouvement sur une scène fixe est de soustraire une image de la scène vide d'objet à l'image où l'on veut détecter les objets. De manière générale cette méthode induit les conditions suivantes:

- 1.- avoir une scène fixe et une image de celle-ci
- 2.- filmer dans des conditions de prise de vue les meilleures possibles

La deuxième condition est nécessaire afin que la soustraction des pixels fixes de la scène donne un résultat le plus proche de zéro à cause de l'absence de mouvement. Les changements de luminosité, le bruit provoqué par des prises de vue en milieu naturel sont peu compatibles avec ce procédé.

En effet, les séquences filmées en extérieur, souvent, ne respectent pas la deuxième condition. De toute façon on essaye de travailler par soustraction d'images moyennant le procédé suivante.

Entre la première image de la séquence où l'avalanche n'a pas été déclenchée et l'image où l'on cherche à détecter l'avalanche, l'éclairage global de la scène varie. De plus la distance séparant la caméra de l'avalanche et les mouvements de convection de l'air conduit à la présence de bruit.

On a travaillé sur images obtenues par enregistrement vidéo d'une avalanche poudreuse déclenchée le 15 Février de 1996 à la Vallée de la Sionne (Suisse). En effectuant la soustraction on a non pas uniquement une zone correspondant à l'avalanche sur un fond presque de niveau zéro mais une image très bruitée de l'avalanche. Les zones fixes sont fortement bruitées. La figure 5-1 montre le résultat sur une ligne d'une soustraction de l'image 5-1 à l'image sans l'avalanche. On distingue entre les pixels 200 et 400 deux pics en 40 et -60. Le pic de droite correspond à l'ombre créée par l'avalanche, le pic de gauche à la zone fortement éclairée de l'avalanche visible sur l'image 5-1. Entre les deux pics, l'éclairage de la neige de l'avalanche est proche de celle du champ de neige initial, la différence est donc peu significative.

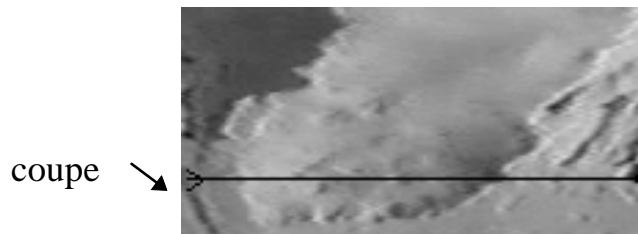


Image 5-1. Image de l'avalanche poudreuse déclenchée le 15 Février de 1996 à la Vallée de la Sionne (Suisse). On peut observer aussi la coupe utilisée pour essayer de déterminer la présence de l'écoulement.

On observe bien sur la figure 5-1 autour de l'avalanche deux zones fortement bruitées avec des pics élevés qui ne correspondent pas à des zones en mouvement. Le bruit sur la coupe est centré en zéro mais une différence d'éclairage pouvant se produire on ajuste la différence précédente en centrant le bruit en zéro. Pour cela on prend une fenêtre de référence, une étendue de neige en dehors de la trajectoire de l'avalanche et on calcule la moyenne  $\overline{I_{fixe}}$  des niveaux de gris de la différence. On soustrait cette moyenne à l'image de la différence.

On remarque que les zones correspondantes à l'avalanche (figure 5-1) sont des pics négatifs, si c'est une zone d'ombre, ou positifs, si c'est une zone suréclairée. On préfère donc prendre la valeur absolue pour pouvoir ainsi définir une valeur de seuil à partir duquel les valeurs correspondent à l'avalanche.

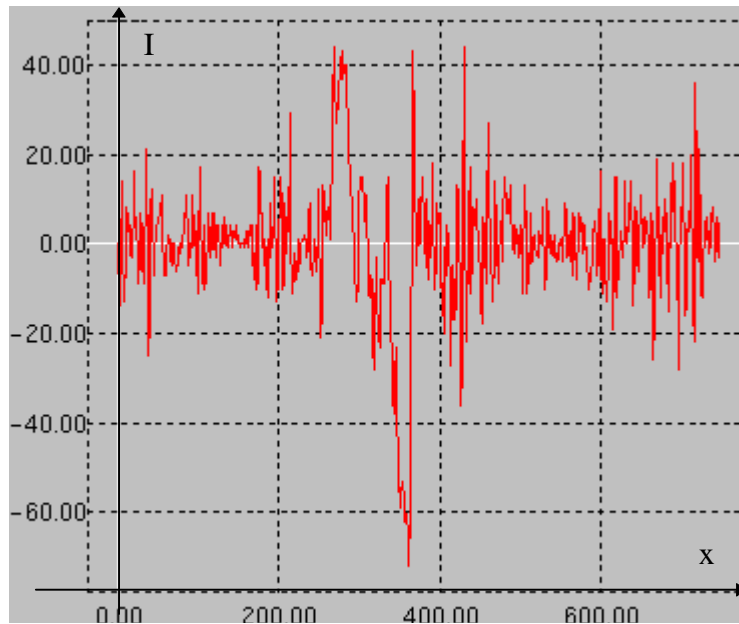


Figure 5-1. Différence simple d'images entre une image sans avalanche et une image avec avalanche. Avalanche poussiéreuse déclenchée le 15 Février de 1996 à la Vallée de la Sionne (Suisse). Dans l'axe x est représenté le numéro de pixels. Dans l'axe y (I) le niveau de gris.

Pour résumer le traitement effectué par deux équations on a :

$$\forall i, j \quad \overline{I_{fixe}} = \frac{1}{nm} \sum_{i,j \in zonefixe}^{n,m} (I_{ij}(t) - I_{ij}(0)) \quad \text{Eq. 5-1}$$

$$D_{ij}(t) = abs(I_{ij}(t) - I_{ij}(0) - \overline{I_{fixe}}) \quad \text{Eq. 5-2}$$

$I_{ij}(t)$  est le niveau de gris du pixel de coordonnées (i,j) sur l'image à la date t.  
 $I_{ij}(0)$  est le niveau de gris du pixel de coordonnées (i,j) sur l'image sans avalanche.  
 $D_{ij}(t)$  est l'image recherchée, elle correspond à l'image des zones en mouvement.

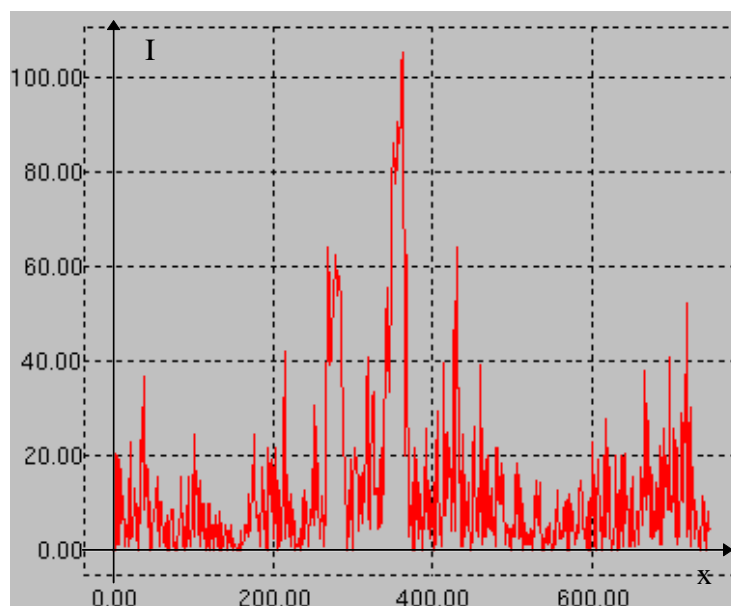


Figure 5-2. Coupe de l'image D. Valeur absolue de la différence. Dans l'axe x est représenté le numéro de pixels. Dans l'axe y (I) le niveau de gris.

Sur l'image D, des zones en mouvement, on applique un filtrage destiné à améliorer les performances de convergence du contour actif ou *snakes*.

Pour lisser l'image D tout en conservant de bonnes frontières, c'est ce que l'on cherche à détecter, on applique un filtre médian d'ordre 3 ou 5. On évite ainsi que certains points du contour soit attirés par des maxima locaux du gradient, des niveaux de gris, de l'image.

On filtre ensuite l'image par une gaussienne de masque 3 par 3 pour lisser l'image ainsi que les frontières et faciliter la convergence des points du snake vers les frontières. La figure 5-3 donne le résultat du filtrage. On distingue nettement les deux pics. Une initialisation d'un contour assez proche à droite et à gauche permettra de segmenter la région des deux pics.

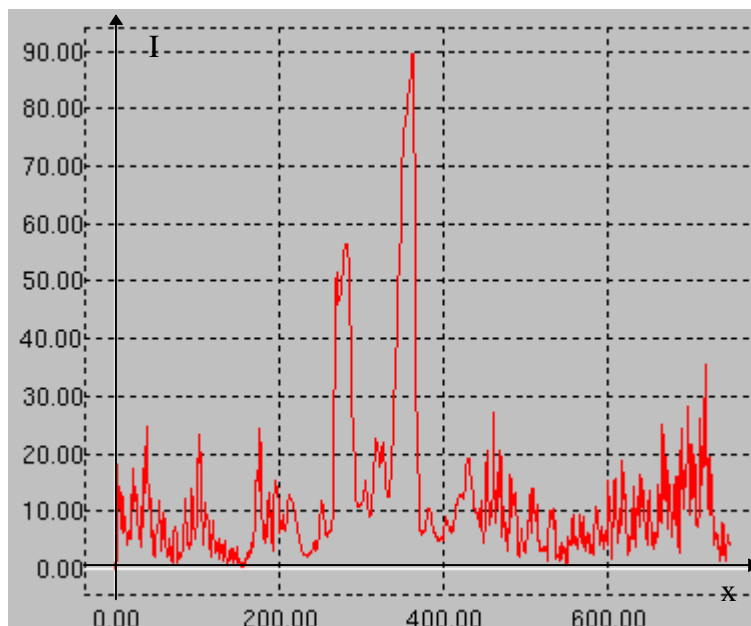


Figure 5-3. Résultat de la figure 5-2 filtrée par une gaussienne de masque 3x3. Dans l'axe x est représenté le numéro de pixels. Dans l'axe y (I) le niveau de gris.

## 5.2 Détection des contours actifs ou *snakes*.

Etant donné que la matière de l'avalanche est identique à celle du champ de neige la différence de texture est faible. De plus certaines zones de l'écoulement sont identiques au fond. C'est pourquoi l'utilisation des contours actifs apparaît la plus raisonnable. Ils nous permet de rassembler des zones différentes en niveau de gris. Seule la frontière entre ces zones et le champ de neige est prise en compte.

Les contours actifs (Kass et al., 1987) forment un outil adapté à l'extraction, la détection et la modélisation des contours d'une image. Ces trois problèmes pour des raisons de simplicité sont souvent traités indépendamment les uns des autres. Il s'agit en distinguant les processus élémentaires d'un problème de trouver une

solution simple à chaque processus. Ce découpage présente l'inconvénient de ne pas tenir compte à chaque étape de l'ensemble des données de l'image.

Les contours actifs présentent l'avantage de ne pas séparer la détection des contours de leur reconstruction en un contour unique. Ils présentent aussi l'avantage de se résoudre par un problème classique qui est la minimisation d'un terme 'énergétique'. Bien sûr de nombreux défauts comme l'importance du choix a priori des paramètres associés au contour, apparaissent d'un point de vue théorique et sont confirmés par l'utilisation pratique de ces *snakes*.

Il existe une grande variété de ces méthodes. D'un auteur à un autre le terme énergétique varie ainsi que la façon de minimiser cette énergie. Chronologiquement la première méthode est celle de Kass et al. (1987) dont nous présenterons les bases théoriques à continuation. Ils partent de la méthode continu qu'est le contour actif pour le discrétiser par la suite. La seconde des méthodes que nous présentons est celui de Cohen (1990) : la méthode de la bulle. Enfin, inspiré des méthodes précédents nous présentons la méthode discrète mis au point par Latombe (1996). Il a été conçu pour s'adapter à l'algorithme plus général de suivi de contour. De plus cette méthode s'applique aux images de qualité médiocre des films à notre disposition, ainsi qu'à un objet 'avalanche' qui se détache peu de son fond.

### **Méthode de Kass.**

Kass, Witkin et Terzopoulos (Kass et al, 1987) furent les premiers à présenter les contours actifs ou *snake*.

Précisons qu'un *snake* est une courbe, fermée ou non, initialisée proche du contour à détecter et qui converge vers celui-ci. La courbe est paramétrisée :

$$C \equiv V(s, t) = \begin{cases} x(s, t) \\ y(s, t) \end{cases} \quad \text{Eq. 5-3}$$

où  $s \in [0, 1]$  et  $t \in [0, T]$

s.- coordonné de la courbe.

t.- temps.

On associe une énergie globale,  $E(C)$ , à ce contour qui se décompose en deux termes : une énergie interne,  $E_{\text{int}}$ , au *snake* qui impose la continuité et la courbure régulière du contour ainsi qu'une énergie externe,  $E_{\text{ext}}$ , liée aux caractéristiques pertinentes de l'image (le gradient du niveau de gris pour les frontières).

L'énergie du contour s'écrit donc :

$$E(C) = \int_C (\lambda_i E_{\text{int}}(s) + (1 - \lambda_i) E_{\text{ext}}(s)) ds \quad \text{Eq. 5-4}$$

$E(C)$  - Energie du contour.

$E_{\text{int}}$  - Energie interne.

$E_{\text{ext}}$  - Energie externe.

Les  $\lambda_i \in [0,1]$  sont les paramètres de régularisation. Si  $\lambda_i$  est proche de 1 l'énergie interne du *snake* est privilégiée et le contour est donc moins sensible aux bruits présents dans l'image et pour tant dans l'énergie externe. Si  $\lambda_i$  est proche de 0, le contour est moins rigide et est plus sensible aux irrégularités du contour. Sur une image contenant une avalanche les deux aspects qui sont recherchés sont opposés. Dans ces images nous avons la présence du bruit et les frontières des objets, écoulements, ne sont pas très nettes. Nous voyons alors que choisir les  $\lambda_i$  soit manuellement soit automatiquement est très important pour la réussite de la détection du contour. Les  $\lambda_i$  sont en général pris identiques mais on peut envisager une adaptation locale des  $\lambda_i$  aux caractéristiques de l'image.

Kass (1987) propose une énergie interne basée sur la continuité des dérivées premières et secondes de la courbe en fonction du t. Ainsi on peut noter :

$$E_{\text{int}}(s) = \alpha(s).(v'(s))^2 + \beta(s).(v''(s))^2 \quad \text{Eq. 5-5}$$

d'où

$$E_{\text{int}}(C) = \int_C [\alpha(s).(v'(s))^2 + \beta(s).(v''(s))^2] ds \quad \text{Eq. 5-6}$$

Cette définition correspond au comportement d'un élastique, de longueur au repos nulle, pour la dérivée première et au comportement d'une latte pour la dérivée seconde.

$\alpha$  et  $\beta$  permettent de donner plus d'importance soit à l'élasticité soit à la rigidité. On peut les choisir identiques pour tous les points du contour ou les adapter localement.

L'énergie externe, ou énergie de l'image, fait intervenir les caractéristiques à mettre en valeur. Pour détecter les frontières c'est le gradient du niveau de gris, qui est choisi.

$$E_{\text{image}}(C) = - \int_C |\nabla(g_\sigma * I(v(s)))|^2 ds \quad \text{Eq. 5-7}$$

On remarque que la fonction  $I(v(s))$  est filtré par convolution avec une gaussienne ( $g_\sigma$ ) pour améliorer la stabilité des résultats.

Cette méthode de type continu demande à être résolu et peut l'être par une approche de type stationnaire puis variationnel par l'introduction du temps. Le théorème d'Euler-Lagrange peut être utilisé pour minimiser la fonctionnelle définie par :  $E(C) = E_{\text{int}}(C) + E_{\text{image}}(C)$ .

### **Méthode de la bulle.**

Cohen (1990) propose un certain nombre d'améliorations à la méthode initiale proposé par Kass et al (1987). Cohen utilise la méthode variationnelle utilisée par Kass. Il conserve les énergies internes du *snake*. Plutôt que d'utiliser une énergie directement liée au gradient de l'image, Cohen propose d'utiliser des détecteurs

de frontières comme le détecteur de Canny-Deriche. On utilise ainsi la supériorité de ces détecteurs sur le simple gradient (méthode de Kass). Ces détecteurs donnent une carte binaire de l'image qui une fois convoluée avec une gaussienne donne une image des frontières utilisable comme énergie de l'image.

Le nom de bulle provient du comportement engendré par le comportement de la force de dilatation que Cohen ajoute afin de modifier la force due au gradient, terme qui contribue à l'énergie externe. La force de dilatation est définie perpendiculaire au contour en chacun de ses points.

A la condition d'initialiser le contour à l'intérieur de la frontière recherchée, on supprime la nécessité d'être proche de la frontière pour être attiré par celle-ci. Cette nouvelle force dilate le contour. Si le contour rencontre une frontière importante il s'y arrête, sinon il la passe mue par la force de dilatation. S'il est arrêté en un point par une frontière locale isolée, le lissage dû aux forces internes de la bulle le fera passer cette frontière.

La nouvelle force de dilatation apparaît comme étant l'apport essentiel de la méthode de Cohen. La méthode de Kass est trop sensible à l'initialisation, la bulle l'est moins.

Cependant le comportement de dilatation limite les objets que l'on peu segmenter. La zone entre le contour initial et celui recherché doit être exempt de frontières importantes.

### **Méthode discrète**

La méthode que nous allons utilisé c'est la méthode discrète (Latombe, 1996 ; Planet et al, 1999). Cette méthode est purement discrète contrairement aux méthodes de Kass et de Cohen. Les points du contour ont des positions entières et n'évoluent donc que de pixel en pixel. Une méthode du même type est proposé par Elomary (1994). Nous allons tout d'abord définir les énergies utilisées puis présenter l'algorithme d'évolution du contour. Le principe de contraindre le contour à se dilater ou à se contracter proposé par Cohen (1990) est utilisé dans cette méthode.

De plus cette méthode ne se résout plus par calcul variationnel comme dans Kass (1987) ou Cohen (1990) mais par une évolution locale de chaque point de telle manière que son énergie diminue. On calcule donc les énergies du point déplacé dans son voisinage.

Cette méthode purement discret ne dispose pas des bases théoriques de la méthode de Kass mais procède plus du choix intuitif de règles régissant le contour. Il possède cependant des propriétés telles que la rapidité de sa convergence ou l'absence de la phase de discrétisation par un maintien du pas constant comme dans Williams et al (1991).

L'expression de l'énergie se réduit à:

$$E = \alpha E_{image} + E_{curv} \quad \text{Eq. 5-8}$$

- L'énergie externe,  $E_{image}$ , est obtenue à partir du niveau de gris de l'image.



Selon l'équation 5-2 l'image est  $D_{ij}$ . L'énergie de l'image,  $E_{image}$ , est définie pour chaque point  $v(s)=(i,j)$  du *snake*  $C(s)$  :

$$E_{image}(i, j) = -(g_H^2(i, j) + g_V^2(i, j)), \quad \text{Eq. 5-9}$$

où

$$g_H = \sum_{k=-1}^{+1} \sum_{l=-1}^{+1} SobelH(i, j) D_{ij}(i+k, j+l) \quad \text{Eq. 5-10}$$

et

$$g_V = \sum_{k=-1}^{+1} \sum_{l=-1}^{+1} SobelV(i, j) D_{ij}(i+k, j+l) \quad \text{Eq. 5-11}$$

$SobelH$  et  $SobelV$  sont les filtres en dérivation Sobels. Il s'agit des filtres qui mettent en évidence les gradients de gris d'une image et permettent donc une meilleure extraction des contours. Les filtres  $SobelH$  et  $SobelV$  sont constitués par les fonctions de voisinage suivantes :

$$SobelH = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -2 & 0 & 2 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array} \quad SobelV = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & -2 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline \end{array}$$

- L'énergie interne,  $E_{curv}$ , d'un point dans le contour de coordonnées  $v_s$  (figure 5-4) est définie comme une sorte de courbure au point  $v_s$ . On calcule l'angle  $(v_s, v_{s-1}, v_{s+1})$  que l'on normalise et qu'on élève au carré. Lorsque l'angle  $(v_s, v_{s-1}, v_{s+1})$  est nul les 3 points sont alignés et donc la courbure est nulle. On élève l'angle au carré pour interdire les angles trop aigus et autoriser une plus large plage de courbure faible.

Le terme  $E_{curv}$  nous permet l'introduction a priori de la forme du *snake*. Pour chaque point  $v(s)$  du *snake*  $C(s)$  :

$$E_{curv} = (\text{angle}(v_{s-1}, v_s, v_{s+1}))^2 \quad \text{Eq. 5-12}$$

- Le paramètre  $\alpha$  nous permet de pondérer l'importance de la contribution de l'énergie de l'image dans le terme énergétique.

Dans la méthode la distance entre deux points est fixée. Nous appelons à cette distance *inter* (figure 5-4).

#### Algorithme de convergence du contour actif

Le contour est initialisé au plus proche de la solution de telle manière qu'il entoure totalement le contour réel.

On fait l'itération des trois points du algorithme suivant un certain nombre de fois :

1.- Calcul des énergies selon ont été décrites à la méthode discrète.

2.- Un contour au temps  $t$  doit être inclus dans le contour au temps  $t+1$ . Nous utilisons pour chaque pixel du contour un voisinage de recherche tout au long de la normale à la frontière du contour (figure 5-4). La nouvelle positions de  $v_s$  au temps  $t+1$  est obtenue de la façon suivante :

Soit  $n_s$  le vecteur normal en  $v_s$  (figure 5-4). On calcule des énergies pour les points  $v_{s,k} = v_s + k n_s$ .

Soit

$$E(v_s, k') = \max_k E(v_s, k) \quad k \in [1, dist] \quad \text{Eq. 5-13}$$

on choisit  $v_s(t+1) = v_s(t, k')$ .

$k$  est un entier choisi à priori et  $dist$  le nombre maximum de pixels tout à long de la normale où on a fait la recherche du minimum de l'énergie. Il dépend de la distance, en pixels, de deux fronts successifs de l'avalanche.

3.- 'Nettoyage' du contour des points confondus, des boucles naissantes et maintient d'une distance *inter* constante entre les points par ajout ou suppression de points. Si  $v_s v_{s+1} \geq 2 \cdot inter$  (figure 5-4) alors on insère un point. Si  $v_{s-1} v_{s+1} < 2 \cdot inter$  on enlève le point  $v_s$ .

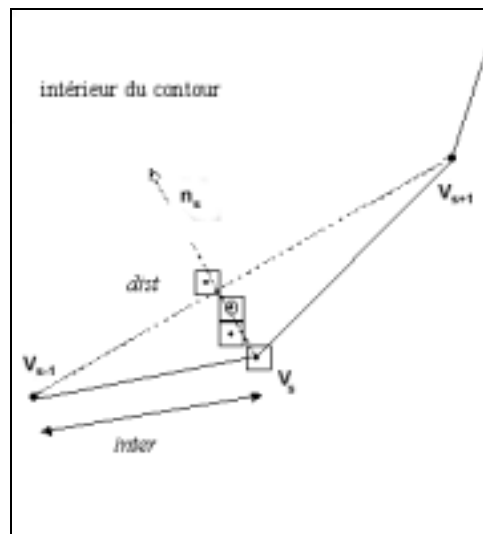


Figure 5-4. Recherche du contour.

Voici un exemple de cette méthodologie. On a appliqué l'algorithme de convergence du contour actif de la méthode discrète à un écoulement avalancheux déclenché artificiellement le 15 Février de 1996 à la Vallée de la Sionne (Suisse). Une importante partie de l'algorithme est le choix du paramètre  $\alpha$  de l'équation 5-8 tandis que un bon choix d' $\alpha$  est indispensable pour la convergence de l'algorithme. Pour chaque séquence il est nécessaire de déterminer le paramètre  $\alpha$ . Les résultats obtenus en considérant  $\alpha=0.0005$  et  $\alpha=0.00001$  sont présentés dans les images 5-2, 5-3, 5-4 et 5-5.

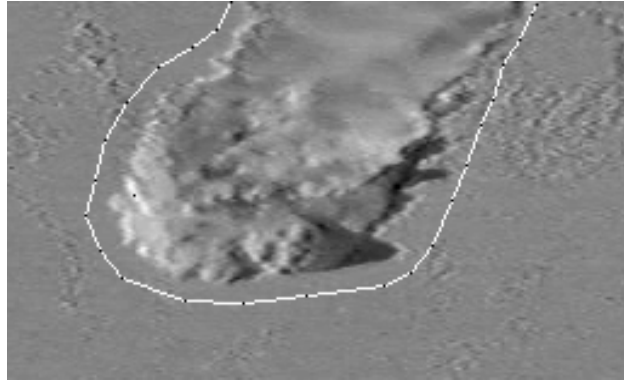


Image 5-2. Image qui nous montre le contour choisi comme contour initial.

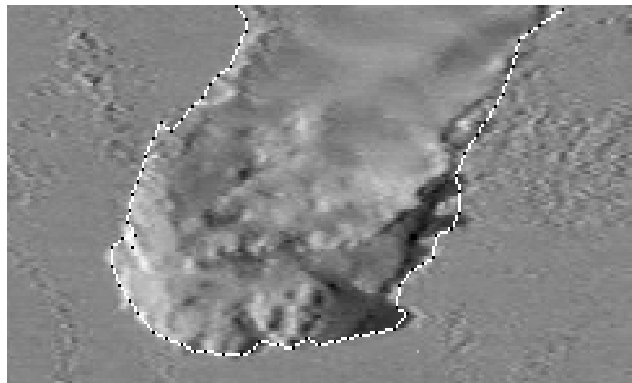


Image 5-3. Contour final en prenant  $\alpha=0.0005$ .

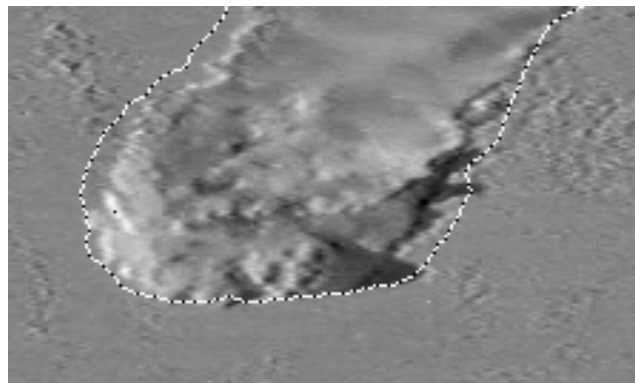


Image 5-4. Contour intermédiaire en prenant  $\alpha=0.00001$ .

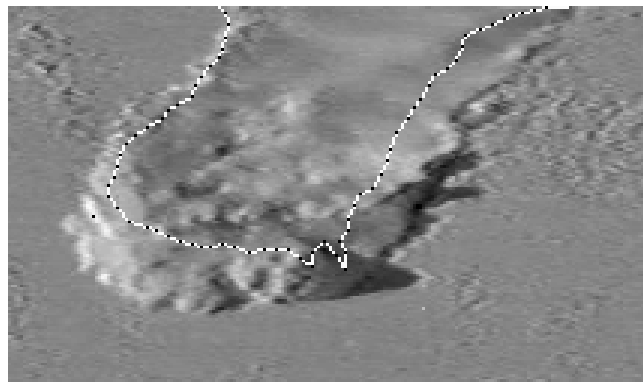


Image 5-5. Contour final en prenant  $\alpha=0.00001$ .

Sur un contour initialisé autour de l'avalanche (image 5-2) (l'image provient de la différence d'une image sans avalanche avec l'image en contenant une avalanche), on obtient au bout de 30 itérations de l'algorithme soit le résultat de l'image 5-3 pour  $\alpha=0.0005$  soit le résultat de l'image 5-5 pour  $\alpha=0.00001$ . Le paramètre  $\alpha$  est mieux réglé vers 0.0005 et conduit à une bonne approche de la frontière de l'avalanche même si le contour n'épouse pas parfaitement le contour réel en certains endroits.

Un paramètre  $\alpha$  plus faible, c'est à dire une moindre importance de l'image dans le terme énergétique conduit à une contraction trop grande.

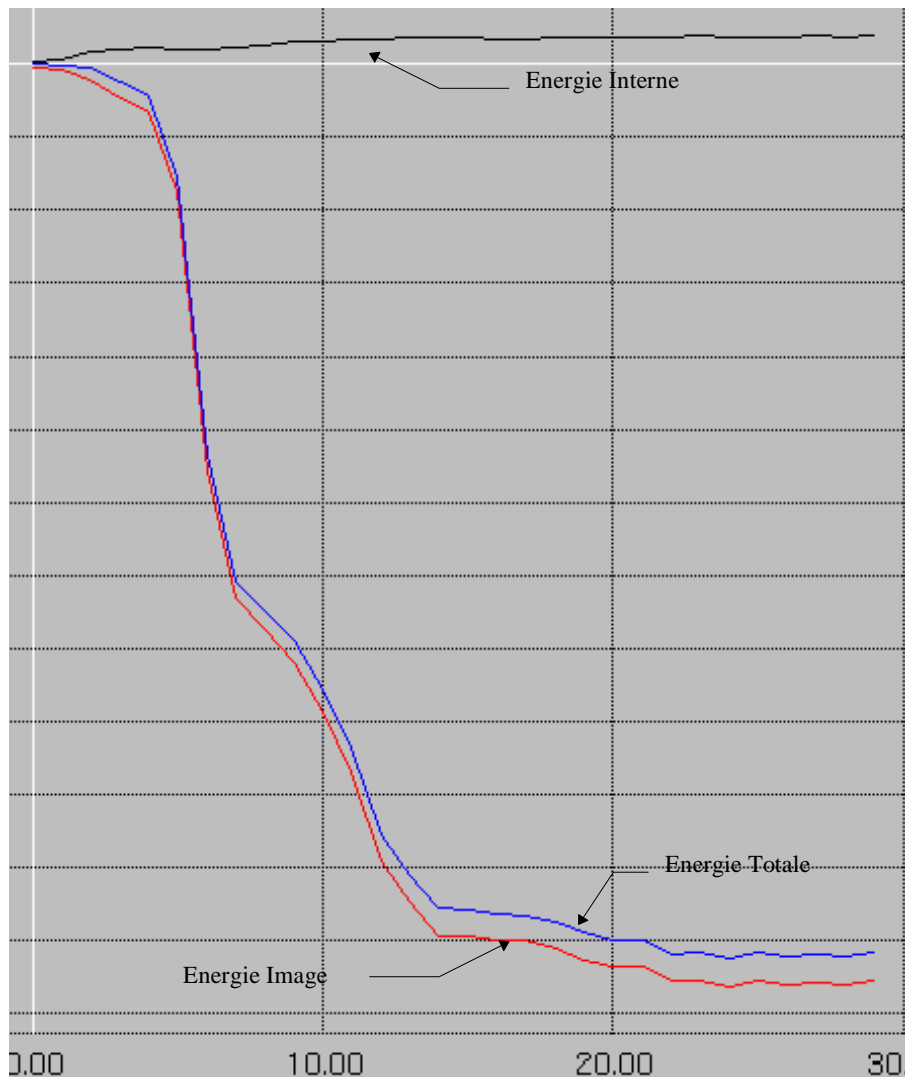


Figure 5-5. Profil énergétique  $\alpha=0.0005$ . Dans l'axe x est représenté le numéro d'itérations.

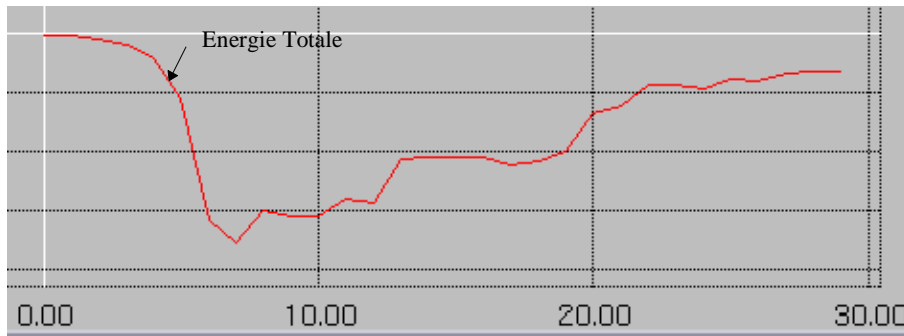


Figure 5-6. Profil énergétique  $\alpha=0.00001$ . Dans l'axe x est représenté le numéro d'itérations.

Les profils énergétiques (figure 5-5 et 5-6) montrent l'évolution de l'énergie associée au contour dans les deux cas précédents, par  $\alpha=0.0005$  et  $\alpha=0.00001$ . Sur la figure 5-5 on observe bien la phase de convergence du contour vers le contour réel dans la phase de décroissance de l'énergie totale (équation 5-8). Vers la 22<sup>ème</sup> itération, l'énergie totale ne varie presque plus et cela correspond à la position d'équilibre du contour.

Par contre pour un paramètre  $\alpha$  moins approprié, la phase de décroissance de l'énergie est suivie d'une phase de croissance. En effet, l'énergie de contraction du contour force le contour à aller au-delà de l'état correspondant à l'itération 7 visible sur l'image 5-5 où le contour approche le contour recherché. Sur la figure 5-6 cela correspond à un minimum d'énergie totale. On pourrait comme le propose Cohen détecter ce minimum comme solution optimale de la convergence, mais ce n'est que la solution optimale pour ce  $\alpha$ . On ne détecte pas le contour optimal à moins de trouver le meilleur  $\alpha$ . De même un  $\alpha$  identique sur le contour ne donne pas la meilleure solution, il faudrait adapter localement le paramètre à la qualité (amplitude en niveau de gris) de la frontière. Ceci impose une connaissance a priori de la frontière ou le lourd calcul de la meilleure configuration.

À continuation nous utiliserons la méthode discrète que nous venons de décrire et l'utilisation des contours déformables avec pour objectif de faire un suivi temporel des contours de l'enveloppe d'une avalanche.

### 5.3 Suivi temporel des contours de l'enveloppe d'une avalanche.

Les méthodes envisagées pour faire le suivi temporel de l'enveloppe d'un écoulement avalancheux sont fondées sur le principe suivant : détecter l'objet, le contour de l'avalanche, et appliquer une déformation au contour pour permettre sa recherche sur l'image suivante avec la finalité, dans notre cas, de faire une estimation de la vitesse du front de l'avalanche.

L'algorithme que nous allons présenter se base donc sur de fortes connaissances a priori. Nous allons définir les propriétés de déformation de l'avalanche.

Tout d'abord l'écoulement avalancheux n'est pas un objet rigide sinon au contraire une sorte de nuage dans le cas d'une avalanche poudreuse ou plus généralement un fluide lorsque l'on pense aux avalanches coulantes. En raison de la pente le contour se déplace vers le bas en s'allongeant et en s'élargissant.

### Méthode de contour déformable

Un problème inhérent au suivi de contours par une méthode de déformation est la difficulté à corriger une erreur faite sur l'estimation d'un contour. Ce problème provient de la récursivité de l'algorithme. Par exemple dans une méthode déformable de région (Laurent et Latombe, 1996), si on commet une erreur sur un contour, on choisit alors une région fautive comme région de référence pour la recherche sur l'image suivante. En toute logique le résultat de la recherche basée sur des données erronées ne donnera pas le résultat attendu. Seule l'étape de l'algorithme récursif qui correspond au contour actif peut corriger ces erreurs. L'algorithme développé ne prétend pas être stable dans tous les cas mais une autocorrection est plus probable puisqu'on utilise principalement un contour actif.

### Algorithme

Le principe de l'algorithme récursif est le suivant (figure 5-7 et 5-8):

Pour chaque image  $I(t)$  de la série :

- on dilate de  $n$  pas le contour de l'avalanche (figure 5-8) obtenu sur l'image précédente  $I(t-1)$  de façon à ce qu'il entoure le contour que l'on recherche. On sait en effet que le contour de l'avalanche se dilate tout au moins sur le front. On choisit  $n$  de telle manière que la dilatation obtenue soit supérieure à l'agrandissement en pixels de l'avalanche.
- on applique alors itérativement un algorithme de contour actif du même type que celui décrit dans le paragraphe 5.2. **Détection des contours actifs ou snakes : méthode discrète**. Ce contour se resserre jusqu'à s'adapter au mieux le contour réel.

On a ainsi obtenu le contour de l'avalanche  $I(t)$ .

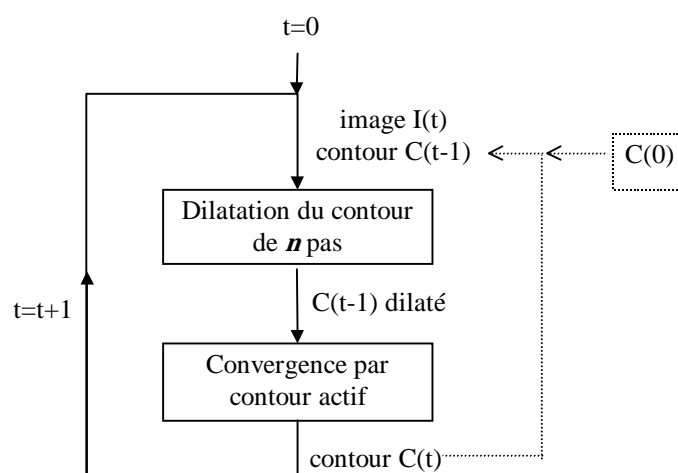


Figure 5-7. Algorithme de suivi

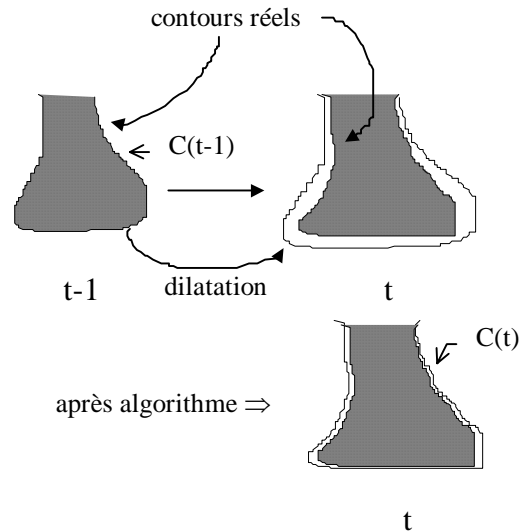


Figure 5-8. Principe de l'algorithme.

La stabilité évoquée vient de ce qu'on dilate le contour afin qu'il englobe le contour recherché. On doit donc, puisqu'on ne connaît pas encore le contour recherché, dilater suffisamment et donc dilater trop. Les parties erronées du contour précédent qui se trouvaient à l'intérieur du contour réel, une fois dilatées, ont des chances de se trouver de nouveau autour du contour réel.

Il faut préciser comment s'effectue la dilatation du contour. Pour dilater d'un pas le contour, tous les points du contour subissent un déplacement d'un pixel suivant la direction de la normale sortante au contour. Les points sont maintenus à distance constante par une phase de suppression ou d'ajout de points.

D'une image sur l'image suivante le contour de l'avalanche se déforme légèrement. Pour essayer de lisser l'évolution du contour il est apparu utile d'introduire une énergie supplémentaire favorisant ce lissage. Aux énergies de la méthode de contour actif on ajoute une énergie nommée  $E_{carte}$  liée au suivi. L'expression de l'énergie totale s'écrit donc maintenant :

$$E = \alpha E_{image} + E_{curve} + \lambda E_{carte} \quad \text{Eq. 5-14}$$

On attribue un coefficient  $\lambda$  à l'énergie associée à la carte des distances pour contrôler son influence.

On crée une carte des distances des pixels de l'image au contour précédent. Cette carte est une image de la même taille que l'image initiale ou chaque niveau de gris indique la distance du pixel au plus proche pixel du contour.

Pour calculer la carte des distances on utilise l'algorithme suivant :

On initialise les pixels de la carte à une valeur maximale MAX.  
Les pixels correspondants au contour sont mis à zéro.

On effectue ensuite quatre balayages : horizontal de la droite vers la gauche ou inversement, vertical de bas en haut ou inversement (figure 5-9).

Pour chaque balayage on met à jour la valeur, niveaux de gris, de chaque pixel si la distance au contour du pixel voisin le plus proche du contour est inférieure à sa valeur diminuée d'un. Dans la figure 5-9, la valeur du pixel A est celle du pixel C augmenté d'un. Le pixel C est en effet plus proche du contour que B par exemple. A droite du pixel A, les valeurs n'ont pas encore été calculées.

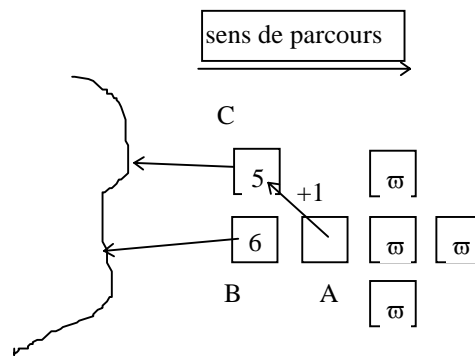


Figure 5-9. Balayage horizontal gauche droite

Ainsi plus un point est éloigné du contour prédit plus l'énergie correspondante est grande. Sur la figure 5-10 on voit une coupe horizontale de l'énergie créée. Les deux vallées représentent la position du contour.

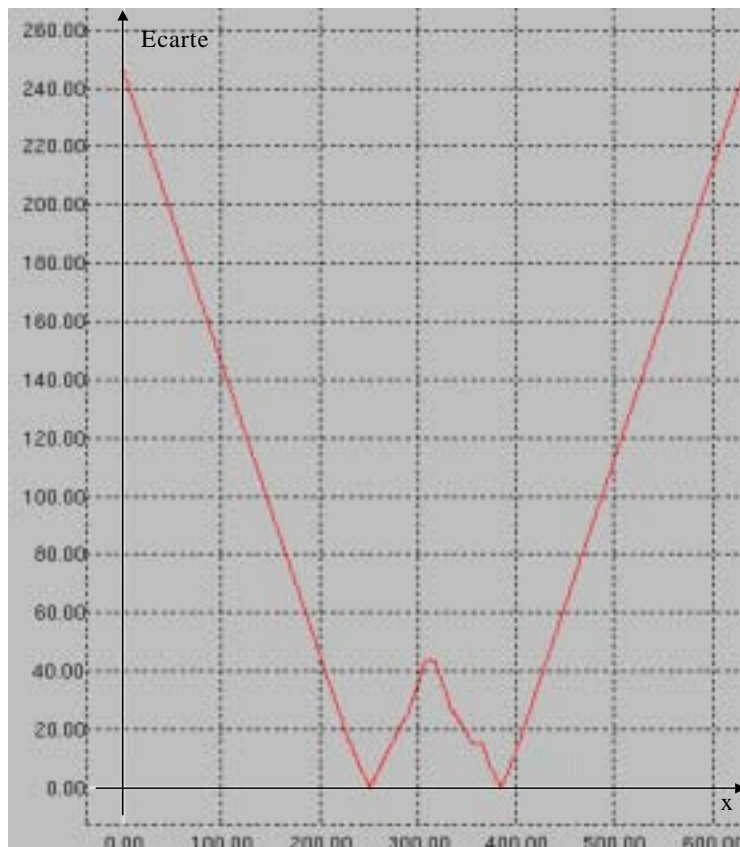


Figure 5-10. Energie de la carte des distances.



Il est apparu à la vue des résultats d'obliger les contours à contenir au sens large les contours qui les précèdent.

En effet, il semble que le contour de l'avalanche ne peut en chaque point que rester sur place ou aller vers l'extérieur du contour. Cette propriété n'est pas 'démontrée' mais elle est logique. Sur le front de l'avalanche, cette propriété est vraie.

On interdit donc aux points du contour d'aller à l'intérieur du contour précédent en remplissant le contour précédent (on le considère fermé en haut) par des pixels de valeur maximale.

Cette démarche possède cependant l'inconvénient suivant :

si un contour à l'issue de l'algorithme se trouve en dehors du contour réel de l'avalanche, l'erreur commise va se reporter sur le contour suivant.

Si l'avalanche se dilate à l'endroit prévu alors l'erreur est supprimée. Si le contour reste fixe, l'erreur demeure mais n'est qu'une erreur de position de quelques pixels. On schématise les répercussions d'une erreur par la figure 5-11.

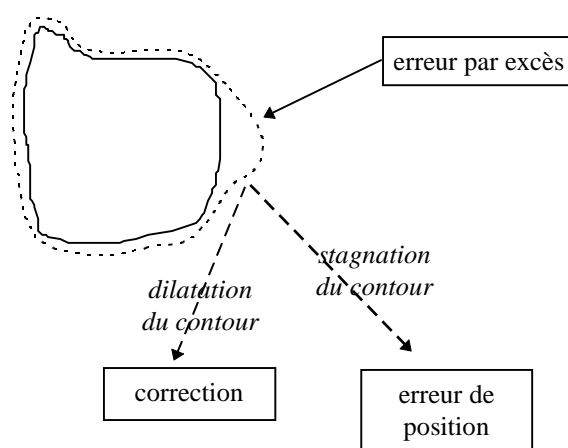


Figure 5-11. Schéma des répercussions d'une erreur.

### 5.3.1 Résultats de l'algorithme de suivi.

L'algorithme de suivi présenté antérieurement a été testé sur des séquences de films d'avalanche.

Les films utilisés ont été les avalanches réelles déclenchées en milieu naturel. Les avalanches réelles sont filmées de loin dans une atmosphère perturbée, avec un éclairage spatial plus uniforme.

On représente la série de contours par une vue dans l'espace. L'axe vertical étant le temps en 1/25 s. Le plan horizontal est le plan de l'image.

On donne pour chaque série deux vues : une de côté et une vue de dessus.

### Avalanche du 15 Février de 1996

À continuation nous présentons les résultats pour une série d'images obtenues par enregistrement vidéo d'une avalanche poudreuse déclenchée le 15 Février de 1996 à la Vallée de la Sionne (Suisse). Une vue de gauche des résultats est présentée dans la figure 5-12 et une vue de dessus est présenté dans la figure 5-13.

Pour cette avalanche nous disposons d'une série de 60 images. Nous considérons le coefficient  $\alpha=0,0005$ , le nombre de dilatation  $n=5$  et le coefficient  $\lambda=0,002$ .

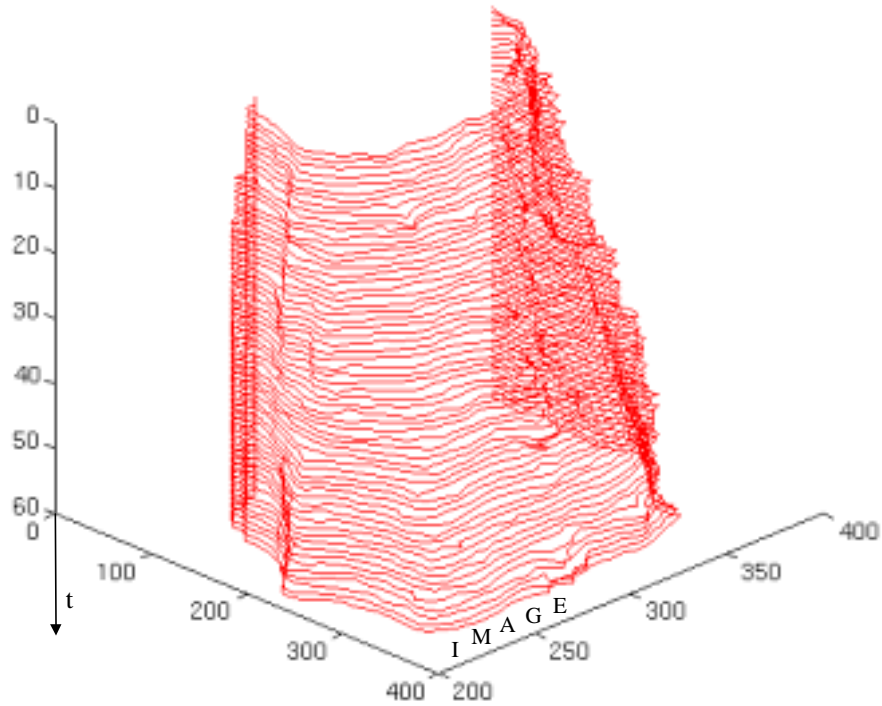


Figure 5-12. Avalanche du 15 Février du 1996 à la Vallée de la Sionne. Vue de gauche.

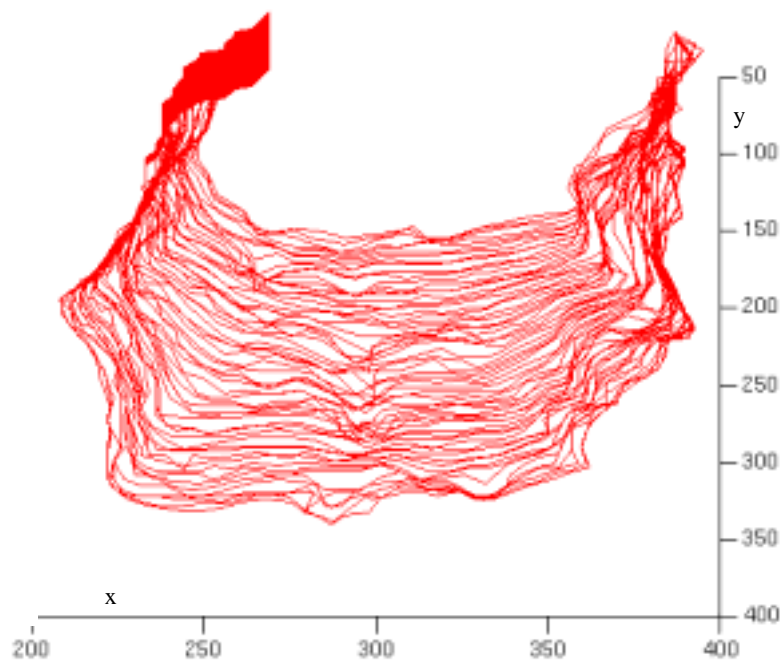


Figure 5-13. Avalanche du 15 Février du 1996 à la Vallée de la Sionne. Vue de dessus.

Nous présentons le résultat du suivi sur la série d'images correspondant à l'avalanche déclenchée le 15 Février 1996 à la Vallée de la Sionne (Suisse). Nous présentons 3 images, la première (image 5-6) est prise au début de la séquence, elle est proche du contour initial. Nous apprécions le contour de l'avalanche très bien définie. L'image 5-7 montre le contour correspondant à la 23<sup>ème</sup> image de la série. L'image 5-8 montre l'amplitude maximale de l'avalanche et son contour est encore tracé avec une grande précision.

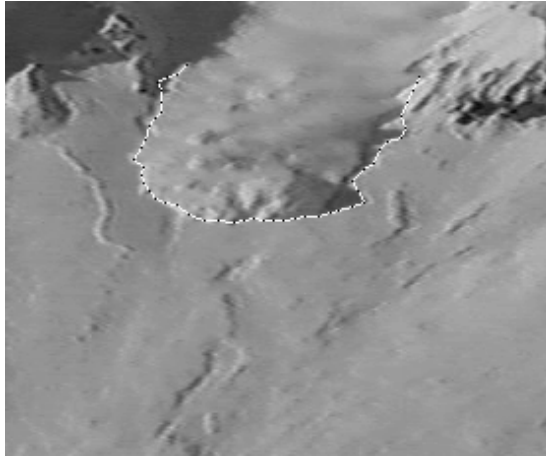


Image 5-6. 7<sup>ème</sup> contour.

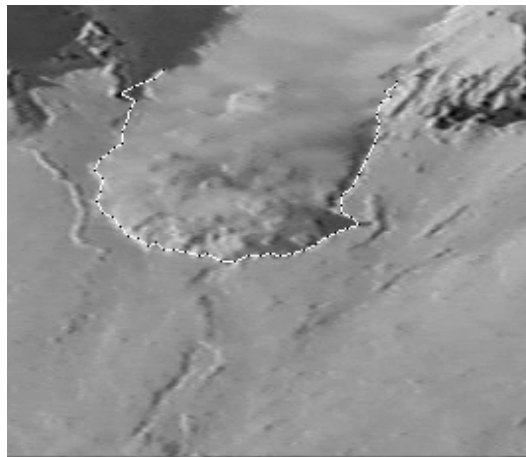


Image 5-7. 23<sup>ème</sup> contour.

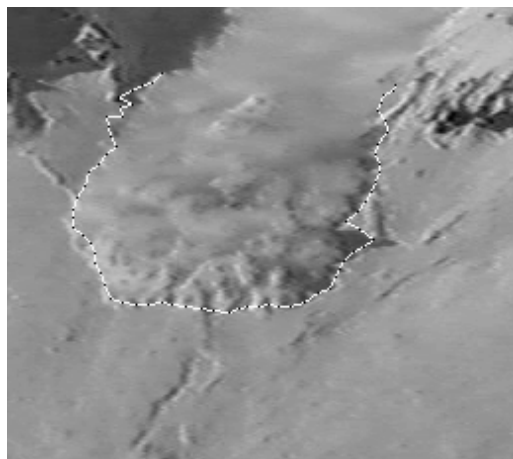


Image 5-8. 43<sup>ème</sup> contour.

### Avalanche du 24 Janvier du 1995

À continuation nous présentons les résultats pour une série d'images obtenues par enregistrement vidéo d'une avalanche déclenchée le 24 Janvier du 1995 au Col du Lautaret (Hautes Alpes). Une vue de gauche des résultats est présentée dans la figure 5-14 et une vue de dessus est présenté dans la figure 5-15.

Pour cette avalanche nous disposons d'une série de 240 images. Nous considérons le coefficient  $\alpha=0,0004$ , le nombre de dilatation  $n=5$  et le coefficient  $\lambda=0,003$ .

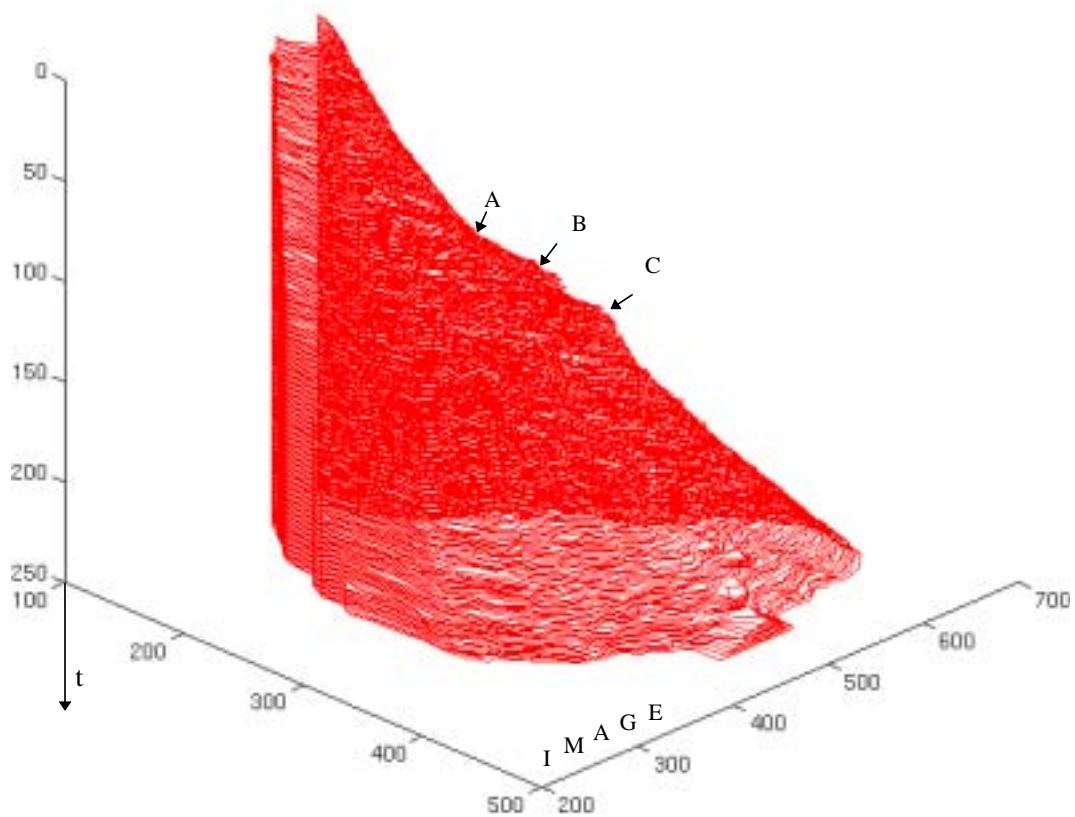


Figure 5-14. Avalanche du 24 Février du 1996 au Col du Lautaret. Vue de gauche. Les endroits A, B et C seront expliqués dans le paragraphe 5.3.2 Interprétation et conclusion sur l'algorithme de suivi.

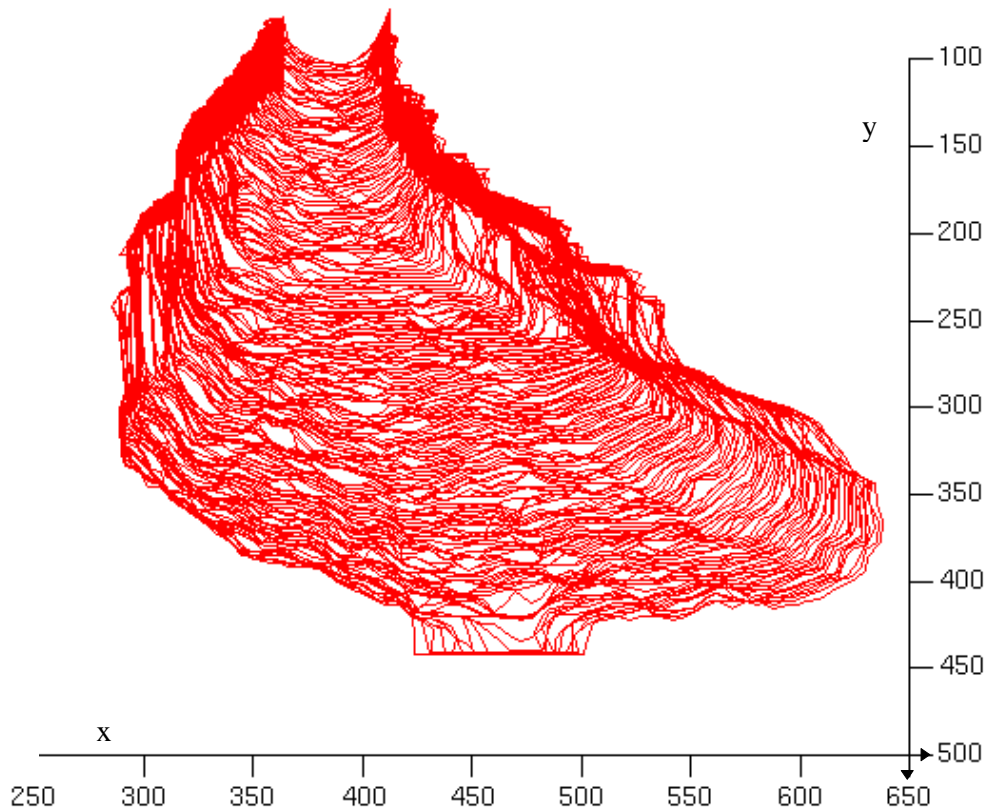


Figure 5-15. Avalanche du 24 Février du 1996 au Col du Lautaret. Vue de dessus.

Nous présentons le résultat du suivi sur la série d'images correspondant à l'avalanche déclenchée le 24 Janvier 1995 au Col du Lautaret (Hautes Alpes). Dans l'image 5-9 nous observons l'instant de la déflagration qui sera la cause de l'avalanche.

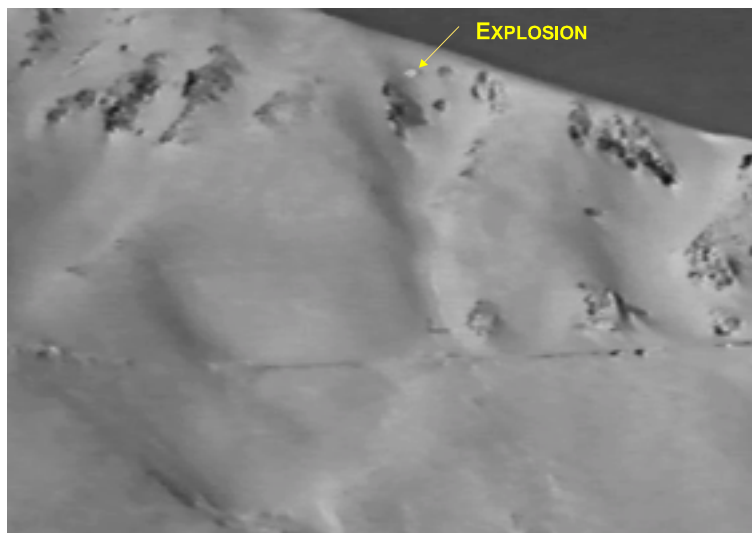


Image 5-9. Image montrant la déflagration qui sera la cause de l'avalanche.

Dans les images 5-10, 5-11 et 5-12 nous montrons trois contours à trois instants différents pour l'avalanche du 24 Janvier du 1995 au Col du Lautaret. Il s'agit du contour initial, d'un contour a moitié du parcours et du contour final.



Image 5-10. Image montrant le contour initial.

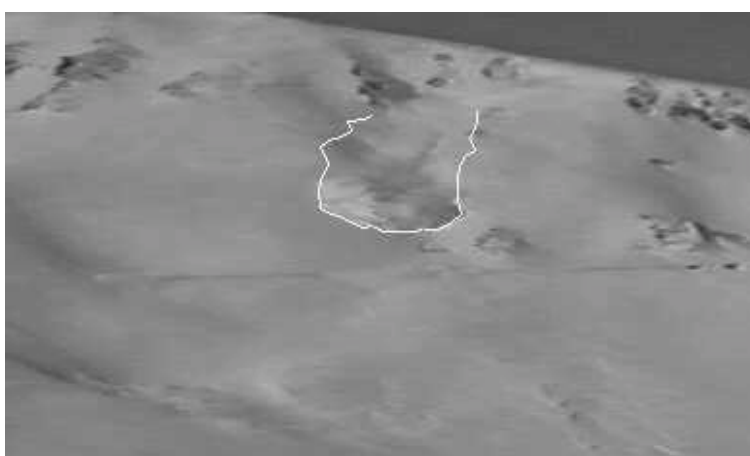


Image 5-11. Contour à moitié du parcours.

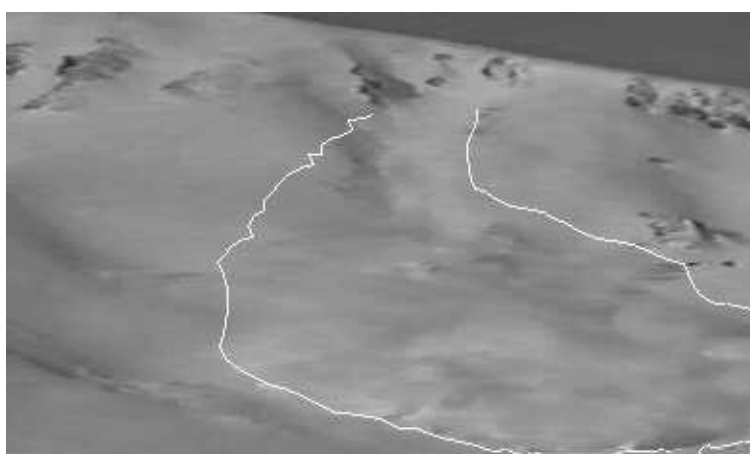


Image 5-12. Contour final.

Nous présentons l'évolution du front de l'avalanche au cours du temps dans l'image 5-13.

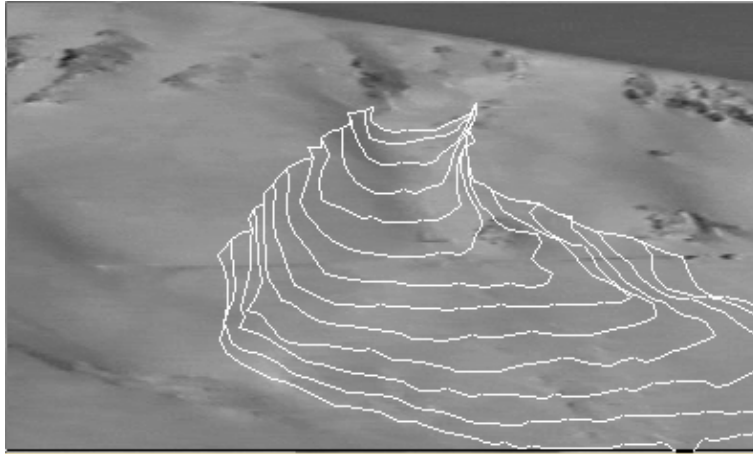


Image 5-13. Différents contours, un chaque seconde, entre le premier et le dernier. Nous pouvons apprécier l'évolution du front de l'avalanche.

### 5.3.2 Interprétation et conclusion sur l'algorithme de suivi.

Aux vues des images précédentes on arrive aux conclusions suivantes :

- Evolution globale bonne mais localement imprécise

La représentation au cours du temps (image 5-13) nous aide à comprendre les variations de vitesse ou les changements de pentent du versant.

La vue de coté gauche (figure 5-14) montre des changements de vitesse du front de l'avalanche en 3 endroits (A,B,C). Le changement en A correspond à la présence d'une route. L'évolution visible sur cette vue est assez lisse visuellement, ce qui témoigne d'une évolution globale satisfaisante.

Par contre les vues de dessus montrent nettement l'insuffisance relative de l'algorithme actuel. Les contours se chevauchent à de nombreux endroits en dehors du front à cause de l'imprécision dans la détection de chaque contour.

On peut facilement interdire au contour à déterminer, de couper le contour précédent. On contraint alors chaque contour à contenir le contour qui le précède. Cette possibilité est offerte dans le logiciel de suivi.

Cependant cette solution provoque une dérive lorsqu'une erreur est commise par excès dans l'estimation d'un contour, l'erreur est reportée sur les contours suivants. Lorsque le contour se dilate en cet endroit l'erreur est compensée au bout de quelques itérations. Si le contour ne se dilate pas en cet endroit on ne commet alors qu'une erreur de position sur le contour, ce qui n'est pas grave si on s'intéresse surtout du mouvement du contour.

En conséquence une estimation locale de la vitesse du contour est difficile à fournir sans cette contrainte forte appliquée au contour. Avec la contrainte précédente d'emboîtement cette mesure est possible notamment sur le front, ce qui est le plus important pour nous, où la précision du contour est en général bonne.

La faisabilité de l'estimation de vitesse du front de l'avalanche est donc prouvée. Le seul problème à résoudre est purement technique et consiste à passer des coordonnées images (2D) aux coordonnées réelles (3D).

- Sensibilité du suivi au choix des paramètres

La liste des paramètres fournis pour le suivi est importante. Cependant seuls trois sont cruciaux. Ce sont le coefficient  $\alpha$  de l'énergie image, le nombre de dilatation  $n$ , le coefficient  $\lambda$  de l'énergie associée à la carte des distances.

Par le coefficient  $\alpha$ , on retrouve un problème classique des contours actifs qu'est le choix de l'importance de l'image par rapport à la force interne au contour. Ce choix dépend de la magnitude des frontières de l'avalanche.  $\alpha$  est de l'ordre de 0.0002 à 0.0005 dans les séquences testées.

Le nombre de dilatation  $n$  doit être légèrement supérieur au plus grand déplacement en pixel du contour de l'avalanche.

Le coefficient  $\lambda$  de l'énergie associée à la carte des distances est de l'ordre de 0.002 à 0,003 dans les séquences testées.

Ces coefficients sont ajustés manuellement. Il faut parfois tester plusieurs valeurs pour réussir un suivi sur l'ensemble de la séquence.

Pour le nombre de dilatation on peut facilement envisager un ajustement automatique de sa valeur au déplacement maximal du contour. On calculerait la boîte englobante de deux contours consécutifs. Cela permet de trouver une dilatation équivalente que l'on multiplie par un facteur d'incertitude supérieur à 1 pour avoir la dilatation à appliquer au contour.

Il faut cependant rappeler que ces contraintes bien que gênantes le sont moins par le caractère expérimental des mesures.

## **5.4 Conclusion de l'estimation de l'enveloppe d'une avalanche.**

L'extraction de paramètres d'une séquence d'avalanche se révèle difficile. En effet les images tournées en milieu naturel sont fortement bruitées. La distance de l'avalanche à la caméra et les conditions climatiques de prise de vue, convection due au réchauffement de la neige, rendent les séquences difficiles à analyser. Le matériel de numérisation intervient en partie dans la mauvaise qualité des séquences d'images à notre disposition.

L'orientation vers les contour actif est justifiée par la non-homogénéité de l'avalanche. Les paramètres tels que la texture, le niveau de gris ne permettent



pas de distinguer l'avalanche. Seules les différences d'éclairement (luminosité forte, ombres) présentes aux bords de l'avalanche permettent de distinguer le contour de l'avalanche. La méthode discrète se révèle le plus efficace.

L'algorithme élaboré pour le suivi utilise principalement un contour actif et fonctionne sur les séquences d'avalanches à notre disposition.

Le calcul de la vitesse du front, soumis aux imprécisions de l'estimation du contour est certainement délicat. Il faut de toute façon traiter auparavant le contour obtenu pour le rendre proportionnel au contour réel ou pour en connaître à l'échelle réelle. C'est pourquoi la connaissance exacte des conditions de prise de vue est importante, en particulier la distance focale, la pente du plan incliné ou du champ de neige où évolue l'avalanche et plusieurs points de repère sur le terrain.

