

Techniques d'imagerie pour la détermination du champ de vitesses à la surface d'une avalanche.

Francesc d'Assís Granada Sales



UNIVERSITAT DE BARCELONA
DEPARTAMENT DE GEODINÀMICA I GEOFÍSICA

Techniques d'imagerie pour la détermination du champ de vitesses à la surface d'une avalanche.

Memòria presentada pel llicenciat en Ciències Físiques

Francesc d'Assís Granada Sales

per optar al grau de Doctor en Ciències Físiques

Aquesta tesi s'ha inscrit dins del programa de doctorat de Tectònica i Geofísica, bieni 92-94, de la Universitat de Barcelona. El treball experimental i la redacció de la present memòria han estat realitzats per Francesc d'Assís Granada Sales sota la direcció de la Dra. Emma Suriñach Cornet en el Departament de Geodinàmica i Geofísica de la Universitat de Barcelona.

Barcelona, juny de 2001.

Dra. Emma Suriñach Cornet

als meus pares,
a l'Emma, el Max i l'Ona.

Agraïments

En la realització d'una tesi doctoral es veuen involucrades moltes persones. En el cas que ens ocupa no podia ser menys, així doncs agraeixo molt a tots aquells que han participat directe o indirectament aquesta tesi doctoral.

En primer lloc, vull agrair a la meva directora de tesi, la Dra. Emma Suriñach Cornet, el seu ajut i dedicació, sobretot des de la meva tornada de Grenoble. D'ella podria destacar el seu puntillisme formal i de fons per intentar fer un treball clar i entenedor. Si no ho hem aconseguit és responsabilitat meva. De totes maneres "cap problema".

Al Jaume Calvet per donar-me l'oportunitat d'iniciar-me en el món de la recerca.

Al Joan Manuel Vilaplana per confiar en mi i proposar-me d'anar a Grenoble.

Al Pierre Villemain perquè, les coses com siguin, va ser l'*alma mater* del projecte en el seu inici. D'ell voldria destacar la seva capacitat de treball i generar idees, encara que sovint li costava molt plasmar-les.

A la gent del LIME per acollir-me al seu laboratori. Sobretot a Mme. G. Revol i Mme. M.L. Galindo per ajudar-me en els feixucs tràmits burocràtics. A la gent del Cemagref per cedir-me les imatges de vídeo i deixar-me participar en les experiències fetes al Lautaret.

A Mohamed Naain per les seves discussions sobre els models numèrics i compartir algun dels seus resultats. A la Glòria Furdada per la informació donada sobre la neu i les allaus i deixar-me el mapa de pendents de Raspes Roies. A la Françoise per compartir part del treball i sempre estar disposada a ajudar en el que fes falta.

Al Fred ... allà on estiguis.

A la Patricia Planet-Ladret per assumir l'orientació i correcció del treball en un dels moments més delicats.

Als meus companys de l'ONU de doctorants que era el LIME, en Richard, en Yacoub, en Vinh, l'Alberto, en Kharim, en Makadam i tots els altres.

Als catalans de Grenoble, l'Eva, el Quim, l'Elisenda, al Dani, en Xavi, l'Óscar, la Mercè i la Montse per fer pàtria lluny de casa.

Al Vinh Le Gia i la Hoa perquè el meu company de despatx em va ensenyar i mostrar que Vietnam no només va ser una guerra.

A l'Hugo Martínez, la Raquel i "los chicos" per estar disposats a ajudar sempre des del primer dia. I per presentar-me a la madame.

Al Roberto per ser un bon tipus i la Inés per reivindicar que Albacete també existeix.

A la madame i al monsieur Loiodice pel seu acolliment al llarg de la meva estada a Grenoble. La meva família a l'exili.

A la Carme per ser la meva companya de viatge en l'espai, del cole a la facultat, i en el temps, de la realitat fins a la dimensió desconeguda.

A la Nuri "Jesusita" per ajudar-me a polir les subtileses de la nostra llengua. A la Maite i l'Esteve perquè gràcies a ells podreu gaudir de l'abstract.

A les institucions que mitjançant els seus projectes han finançat aquest treball. Al projecte de Capital Humà i Mobilitat, Contribution à l'étude de la dynamique des avalanches dans un but de cartographie du risque et formation à la modélisation dans le domaine des phénomènes naturels, CHRX-CT93-0307 i al projecte SAME, Snow Avalanche Modelling and Warning in Europe, ENV4-CT96-0258.

A la MAC, el Felip, el David i el Víctor per córrer darrera del Max pel pati durant les meves reclusions.

Als meus pares per animar-me a emprendre aquest viatge i per la resta que han fet, fan i faran. A l'Esteve per obrir-me el camí de les ciències i portar per sempre, al seu braç, un record meu. "Si, Esteve?". A la Txell per tots els moments passats al llarg dels anys conviscuts sota el mateix sostre.

Al Max i l'Ona perquè són font de petits instants que omplen infinites vegades més que una tesi.

A l'Emma per ser l'Emma. Perquè hi ha moltes maneres d'ajudar i no en conec cap en que ella no hagi participat. Perquè és la persona que més ha patit durant aquest treball. Per ser com és. Per ajudar a relativitzar les coses i demostrar que no només de tesis viuen les persones. Per estimar, tenir cura, mimar i respectar tot allò que l'envolta. Gràcies Emma.

Table des matières

Abstract.....	15
Resum en català.....	17
Introducció.....	19
1 Neu, Allaus i Models Numèrics.....	21
1.1 Propietats físiques de la neu.....	21
1.2 Les allaus de neu.....	22
1.3 Models numèrics de les allaus.....	23
1.3.1 Models empírics. Model de Voellmy.....	23
1.3.2 Models a partir de la mecànica de fluids.....	24
2 El moviment en Tractament d'Imatges.....	25
2.1 Introducció.....	25
2.1.1 Generalitats.....	25
2.1.2 Problemes generals.....	26
2.2 Detecció del moviment.....	26
2.2.1 El problema.....	26
2.3 Estimació del moviment.....	27
2.3.1 Mètodes espacials.....	27
2.3.2 Mètodes freqüencials.....	28
3 Estimació de la velocitat en superfície d'una allau densa.....	31
3.1 Introducció.....	31
3.2 Obtenció de les dades.....	31
3.3 Resultats de l'aplicació dels mètodes espacials.....	32
3.3.1 El flot optique.....	32
3.3.2 Conclusions sobre el flot optique.....	32
3.4 Resultats de l'aplicació dels mètodes freqüencials.....	32
3.4.1 Espectre de fases.....	32
3.4.2 Cepstre.....	33
3.4.3 Correlació d'imatges.....	34
3.4.4 Conclusions sobre els mètodes freqüencials.....	34

4	<i>Estimació de la velocitat en superfície d'una allau densa. El mètode adaptable.</i>	35
4.1	Introducció	35
4.2	Anàlisi del problema	35
4.2.1	Model	36
4.2.2	Algorisme del mètode adaptable	38
4.2.3	Consistència i límits del mètode	38
4.2.4	Resultats obtinguts aplicant el mètode adaptable	39
4.2.4.1	Estudi espacial	39
4.2.4.2	Estudi temporal	39
4.2.5	Càlcul de l'alçada de l'allau	41
4.2.6	Error i validació de resultats	42
4.3	Conclusió	42
5	<i>Altres mètodes de tractament d'imatges per a l'estudi de les allaus: estimació de la variació del contorn d'una allau.</i>	45
5.1	Detecció de la zona de l'allau per diferència d'imatges	45
5.2	Detecció dels contorns actius	46
5.3	Seguiment temporal dels contorns d'una allau	47
5.3.1	Resultats de l'algorisme de seguiment	48
5.3.2	Interpretació i conclusions sobre l'algorisme de seguiment	48
5.4	Conclusions de l'estimació del contorn d'una allau	48
6	<i>Comparació entre els resultats del Seguiment dels Contorns, la Sísmica i els Models Numèrics.</i>	51
6.1	Tractament d'imatges	51
6.2	Estudi dels senyals sísmics	52
6.3	Models numèrics	53
6.4	Conclusions	54
	Conclusions	55

Texte en français.	57
Introduction.	59
1 Neige, Avalanches et Modèles Numériques.	63
1.1 Propriétés physiques de la neige.	63
1.2 Les Avalanches.	69
1.3 Les modèles numériques des avalanches.....	79
1.3.1 Les modèles empiriques. Le modèle de Voellmy.	79
1.3.2 Les modèles à partir de la mécanique des fluides.	81
1.3.2.1 Les modèles newtoniens.	82
1.3.2.2 Les modèles binghamiens.	82
1.3.2.3 Les modèles granulaires.....	83
1.3.2.4 Les modèles turbulents pour les avalanches aérosols.....	83
1.3.3 Conclusion sur les modèles.	84
2 Le mouvement en Traitement d'Images.	85
2.1 Introduction.	85
2.1.1 Généralités.	86
2.1.2 Problèmes généraux.	87
2.2 Détection de mouvement.....	88
2.2.1 Le problème.	88
2.3 Estimation du mouvement.	90
2.3.1 Méthodes spatiales.	90
2.3.2 Méthodes fréquentielles.	95
2.4 Résumé.	101
3 Estimation de la vitesse en surface d'une avalanche dense.	103
3.1 Introduction.	103
3.2 Obtention des données.	104
3.3 Résultats des méthodes spatiales.....	106
3.3.1 Le flot optique.....	106
3.3.2 Conclusions des méthodes spatiales.....	108
3.4 Résultats des méthodes fréquentielles.....	108
3.4.1 Spectre de phases.	109
3.4.2 Cepstre.....	114
3.4.3 Intercorrélation d'images.	118
3.4.4 Conclusion des méthodes fréquentielles.	121

4	<i>Estimation de la vitesse en surface d'une avalanche dense. La méthode adaptative.</i>	123
4.1	Introduction.	123
4.2	Analyse du problème.	124
4.2.1	Modélisation.	125
4.2.2	Algorithme de la méthode adaptative.	128
4.2.3	Robustesse et limites de la méthode.	130
4.2.4	Résultats obtenus en appliquant la méthode adaptative.	134
4.2.4.1	Etude spatiale.	135
4.2.4.2	Etude temporelle.	142
4.2.5	Calcul de la hauteur de l'avalanche.	170
4.2.6	Erreurs et validation des résultats.	173
4.3	Conclusion.	174
5	<i>Autres méthodes d'étude des avalanches: estimation de la variation de l'enveloppe d'une avalanche.</i>	177
5.1	Détection de la zone de l'avalanche par différence d'images.	178
5.2	Détection des contours actifs ou <i>snakes</i> .	181
5.3	Suivi temporel des contours de l'enveloppe d'une avalanche.	189
5.3.1	Résultats de l'algorithme de suivi.	193
5.3.2	Interprétation et conclusion sur l'algorithme de suivi.	199
5.4	Conclusion de l'estimation de l'enveloppe d'une avalanche.	200
6	<i>Comparaison Image - Sismique - Modèles Numériques.</i>	203
6.1	Traitement d'images.	204
6.2	Etude des signaux sismiques.	206
6.3	Modélisation Numérique.	210
6.4	Conclusions.	214
	Conclusions.	215

Annexes.	219
allau_mars91, allau_gener92 et allau_abril92.	221
angleb.....	222
cepstrum.....	223
detrame.	224
PolarRep.	225
soroll.	226
totesphasesR_Tot.....	227
wienerb.....	228
Sommaire des Figures.....	229
Sommaire des Images.....	233
Sommaire des Tables.....	236
Bibliographie.	237

Abstract.

Avalanches are a natural phenomenon with a related risk that has not stopped growing in the last years due to the massive use of the mountainous zones by the human being. Therefore it is important to minimise the negative consequences of this natural risk through the detection, prevention and reduction of the impact of the avalanches on the environment.

The thread of this research is the use of image processing applied to avalanches. As experimental evidence we have got the video recording of artificially caused avalanches in *Col du Lautaret* (French Alps), in *Vallée de la Sionne* (Switzerland) and in *Boí Taüll* (Catalan Pyrenees). So we will have a 2D representation of a 3D phenomenon.

One of our objectives is to create an image processing utility that allows us to determine the distribution of the velocities on the surface of the avalanche. This study is one of the components that make possible to analyse the mechanism of the avalanches, the morphology of this flow and, finally, to improve the models that let us estimate the risks according to the topography of the terrain.

This document is divided into six parts:

The first chapter is an introduction to the properties of the snow and to the numerical models to establish the general frame of the work.

The second chapter is a description of the motion analysis techniques in image processing introducing methods as the optical flow, phase spectrum, cepstrum and image intercorrelations.

In the third chapter we can find the results obtained using the techniques explained in chapter two. These methods haven't been efficient enough to determine the field of velocities on the avalanche surface.

Chapter four includes the theoretical development and the experimental results of the adjustable method. This does allow us to do the calculation of velocities on the avalanche surface, which is our first objective. At the same time a method has been developed to calculate the height of an avalanche at a certain point.

A second objective is to estimate the variation of the avalanche outline during its run. In the fifth chapter we develop the algorithms which, using the active outlines, will allow us to achieve our second objective.

Finally, the sixth chapter shows a first approach to the use of the results obtained from the image processing in the fields of seismology and of avalanche numerical modelling. It is only a first step and many other experimental examples will be needed to draw any conclusions. In fact this was not among our initial aims.

Although we have presented results, the difficulty of performing experimental work in the open air must not be forgotten. The first one is the impossibility to control the experimental conditions and, therefore, the difficulty to repeat exactly the same experiences as we could in the laboratory. A second one is the difficulty to obtain the experimental data -video recording- when dealing with a seasonal phenomenon. The last remarkable difficulty is the fact that the images are, unavoidably, weakly contrasted: white objects moving on a white background.

Looking further ahead, one of the main possible lines of research could be making 3D instead of 2D-calculation of velocities. To achieve this aim we should equip the experimental zones with reference points and take topographic measures. A second line would be the creation of an interface that made possible, with the use of digitalized images, to calculate the velocity cartography, the height of the avalanche and monitor the outlines. This would help any user to work easily in this domain. A third line of work is opened by the possibility to go deeper into the knowledge of the image-seismic-model comparison and check if there is any relation beyond the simple qualitative comparison.

Taking into account the results obtained with the avalanches, this methodology may be exported to other phenomena as torrential lava streams.

More experimental data would be necessary to fulfil all these research lines.

Finally, it should be remembered that this is the first time that image-processing methods have been used to get information relative to the avalanche dynamics through simple video recording. It has been after this first work using video recording that all the experiences on avalanche dynamics use nowadays video recordings synchronised with other instruments.

Tècniques de tractament d'imatges per a
la determinació del camp de velocitats
en superfície d'una allau.

Resum en català.

Introducció.

Les allaus de neu són un fenomen natural que presenta un risc associat que no ha deixat d'augmentar en els últims anys a causa de la utilització en massa per part de l'home de zones de muntanya. És important, doncs, intentar minimitzar les conseqüències negatives d'aquest risc natural a partir de la detecció, la prevenció i la reducció de l'impacte que les allaus de neu provoquen en el medi ambient.

L'estudi de riscos naturals i més concretament del moviment dels materials naturals (allaus o les laves torrencials) i de com modelar aquests moviments són temes de recents programes de recerca a nivell europeu.

Aquest treball es va desenvolupar sota dos projectes europeus: el primer, Capital Humà i Mobilitat (Contribution à l'étude de la dynamique des avalanches dans un but de cartographie du risque et formation à la modélisation dans le domaine des phénomènes naturels), i el segon, el SAME (Snow Avalanche Modelling and Warning in Europe).

Dins del projecte SAME hi ha un acord de col·laboració entre el LIME (Université Joseph Fourier de Grenoble), el Cemagref (de Grenoble) i el Departament de Geodinàmica i Geofísica (Universitat de Barcelona).

El LIME era un laboratori d'electrònica i microinformàtica i es dedicava a crear aplicacions per tal d'estudiar fenòmens naturals. El meu treball al LIME va consistir a desenvolupar una utilitat que em permetés extreure informació de la dinàmica de les allaus a partir d'imatges de vídeo. Aquest laboratori va desaparèixer i va ser reabsorbit per altres departaments de la mateixa Université Joseph Fourier.

La Division Nivologie du Cemagref es dedica entre d'altres tasques a realitzar campanyes de recollida de mesures en un camp experimental que està situat al *Col du Lautaret* (Alps francesos). En aquest laboratori vaig realitzar les campanyes experimentals de recollida de dades, enregistraments de vídeo d'allaus de neu. Cal recordar que entre les dificultats que aquesta recollida de dades comporta hi ha el fet que és un fenomen estacional, que es treballa en condicions extremes (alta muntanya i baixes temperatures) i la impossibilitat de controlar i repetir les condicions experimentals.

L'hivern de 1986-87 va iniciar el Servei Geològic de Catalunya i la Universitat de Barcelona l'estudi del risc de les allaus als Pirineus catalans. Els treballs que fan aquests dos centres són bàsicament la predicció del risc d'allaus, la producció de mapes d'allaus i la recerca.

En aquest treball s'ha creat una utilitat de tractament d'imatges que ens permet determinar la distribució de velocitats a la superfície d'una allau de neu. Aquest estudi és un dels components que permetrà analitzar el mecanisme de flux dels fluids, la morfologia d'aquest flux, i finalment afinar els models que permeten estimar els riscos en funció de la topografia del terreny. La primera fase del treball va consistir a fer una recerca bibliogràfica sobre els mètodes de cartografia de velocitats utilitzats en diferents camps que abraçaven des de la meteorologia fins a la física atòmica. Aquesta recerca ens va permetre constatar que no hi havia cap cartografia de velocitats d'allaus de neu feta a partir del tractament d'imatges. Així doncs el nostre primer objectiu va ser realitzar una cartografia de velocitats d'una allau de neu a partir d'imatges extretes d'una pel·lícula de vídeo. Un segon objectiu va ser la detecció i el posterior seguiment del contorn d'una allau.

El fil conductor d'aquest treball de recerca és la utilització de tècniques de tractament d'imatges aplicades a les allaus de neu. Com a dades experimentals disposem de filmacions en vídeo d'allaus provocades artificialment al *Col du Lautaret* (Alps francesos), a la *Vallée de la Sionne* (Suïssa) i a Boí Taüll (Pirineus catalans).

Aquest document està dividit en sis parts.

En el capítol 1 es presenta de manera molt resumida una introducció a les propietats físiques de la neu, a les allaus de neu, i als models numèrics per tal d'establir el quadre general on es desenvolupa el treball.

En el segon capítol es fa una descripció de les tècniques d'anàlisi de moviment en tractament d'imatges. Recordem els principis de la detecció del moviment, l'estimació del moviment tot presentant mètodes com el *flot optique*, l'espectre de fase, el cepstre i la intercorrelació d'imatges.

En el capítol 3 es presenten els resultats obtinguts un cop utilitzats els mètodes exposats en el segon capítol que, com es veurà, no són gaire eficaços per tal d'assolir els nostres objectius.

En el capítol 4 presentem la metodologia que ha resultat ser la millor per tal de poder assolir el nostre primer objectiu. A aquesta metodologia li hem donat el nom de mètode adaptable. En aquest capítol presentem el desenvolupament teòric i els resultats experimentals.

El segon objectiu del nostre treball s'aborda en el cinquè capítol. Així doncs, presentem en aquest capítol l'estimació de la variació del contorn d'una allau utilitzant la metodologia dels contorns actius.

Finalment, en el sisè capítol mostrem una primera aproximació de la utilització dels resultats obtinguts a partir del tractament d'imatges en els camps de la sísmica i dels models numèrics d'allaus.

El document conclou amb unes conclusions generals i una sèrie d'annexes.

1 Neu, Allaus i Models Numèrics.

En el primer capítol farem un recordatori de les principals propietats físiques de la neu, presentarem després els diferents tipus d'allaus i les seves característiques i acabarem fent la presentació dels principals models numèrics que existeixen.

1.1 Propietats físiques de la neu.

La neu és un material porós, barreja de gel, aire i a vegades aigua líquida. Aquest material té unes propietats físiques específiques.

La densitat.

La densitat de la neu és la quantitat de massa de neu per unitat de volum. Es mesura en kg/m^3 , i pot variar entre 20 i 550 kg/m^3 .

El contingut d'aigua.

Determina el grau d'humitat de la neu i es calcula fent el quocient entre el volum d'aigua líquida i el volum total de neu.

La cohesió de la neu.

Hi ha una forta relació entre la cohesió i la resistència de la neu. Hi ha quatre tipus de cohesió. Per imbricació de cristalls, és una cohesió fràgil i desapareix quan comencen els metamorfismes. Per ponts de glaç, aquests ponts són deguts a la condensació sòlida del vapor d'aigua en els punts de contacte entre els grans de neu. La cohesió capil·lar és deguda a la presència d'una pel·lícula d'aigua que envolta els grans de neu i assegura una unió entre ells. La cohesió de Regel es dona quan els grans de neu se solden perquè l'aigua present a la neu es gela.

La resistència a la compressió, a la tracció i al cisallament

La neu pot ser considerada com un material plàstic i viscos i es pot deformar fins a la destrucció dels cristalls de neu. Aquest és el límit que serveix per definir la resistència de la neu. Cada element del mantell nival situat en un pendent pot estar sotmès a esforços de compressió, tracció o cisallament (figura 1-1).

La plasticitat i la viscositat de la neu.

Segons el seu nivell de metamorfisme i de la seva temperatura, la neu pot deformar-se més o menys sense ruptura (plasticitat), o desplaçar-se més o menys fàcilment en un pendent (viscositat).

Els intercanvis energètics.

El mantell nival és un conjunt de diferents estrats homogenis formats per neus diferents, on el metamorfisme està estretament lligat als intercanvis energètics amb l'atmosfera i el sòl. Dins d'aquests intercanvis podem destacar el flux tèrmic del sòl (figura 1-2), els rajos solars i l'albedo (figures 1-3 i 1-4), el coeficient d'absorció, l'emissió de radiació tèrmica i finalment la temperatura de l'aire, la humitat, el vent, la pluja i la neu. Tots aquests intercanvis queden reflectits en la figura 1-5.

1.2 Les allaus de neu.

Donar una definició precisa del terme *allau* és bastant complicat perquè es tracta d'un fenomen complex, multiforme i molt variable tant en l'escala de temps com d'espai. D'entrada podem dir que es tracta d'un flux ràpid de neu en un vessant d'una muntanya. Per comprendre millor el fenomen de les allaus és necessari fer una classificació d'una manera molt general d'algunes de les seves característiques. És relativament fàcil distingir dues classes de flux extrems: l'allau densa, que seria el desplaçament d'una massa de neu viscosa que té tendència a seguir el relleu sent l'alçada d'aquesta massa de l'ordre del metre, i l'allau aerosol, que seria un flux ràpid de neu sota la forma d'un núvol.

En aquest apartat intentarem definir els mecanismes que intervenen en la formació de les allaus.

Deformació lenta del mantell nival.

Els esforços aplicats al mantell nival i les seves propietats de plasticitat i viscositat condueixen a un moviment i a una deformació del mantell. Aquesta deformació depèn també del pes de la neu i de la topografia del terreny. La podem descompondre en reptació, que es subdivideix en assentament i fluència, i en lliscament. Aquesta descomposició es pot observar a la figura 1-6.

Factors de desencadenament.

Els diferents paràmetres que poden desencadenar una allau es divideixen en tres categories. Els paràmetres meteorològics, com serien les precipitacions, el vent i la temperatura de l'aire; els paràmetres interns en el mateix mantell (paràmetres nivològics); i els paràmetres del terreny, que serien la morfologia del terreny, l'exposició del vessant, la rugositat del terra i la vegetació.

Característiques del flux.

Generalment, la manera de desplaçar-se la neu, la morfologia del flux i els mecanismes de transferència de massa són totalment diferents entre una allau aerosol i una de densa. Les allaus aerosols són uns fluxos molt turbulents formats per una barreja d'aire i partícules de gel. Es desplacen ràpidament amb velocitats entre els 30 i els 100 m/s i poden créixer fins a alçades importants. Les allaus denses s'assenben a les laves torrencials o volcàniques i es desplacen a velocitats molt inferiors que les aerosols.

Naturalesa del material mobilitzat.

La neu mobilitzada per una allau presenta característiques molt diferents de la neu en repòs. Mentre que en els aerosols el material és una suspensió de partícules de gel, de l'ordre del mil·límetre en l'aire, en el cas de les allaus denses el material és una barreja de neu i aire i a vegades hi ha la presència d'aigua en forma líquida i boles de neu.

El moviment o la dinàmica de les allaus.

Podem distingir tres etapes al llarg del recorregut de les allaus. La primera, que és on es troba la neu que es posarà en moviment, és la zona de sortida. La segona, on hi ha l'acceleració i la conservació de la velocitat de l'allau, és la zona de trajecte. I finalment en tindríem una on hi ha desacceleració i parada que és la zona de dipòsit.

Classificació de les allaus.

Existeixen moltes classificacions d'allaus en funció del país i de la disciplina estudiada. Les diferents classificacions d'allaus prenen doncs sentit en funció de l'objectiu pel qual la informació està representada. Nosaltres hem triat la classificació de Rapin et Pahaut (2000), que fa referència a les diferents zones del flux, als diferents criteris dins de cada zona i als caràcters distintius de cada criteri (taula 1-1).

1.3 Models numèrics de les allaus.

No tenim la intenció de presentar un inventari complet dels models físics de la dinàmica de les allaus ja que són massa nombrosos. Es tracta només de fer notar la complexitat del fenomen. Descriurem només els principals tipus de models, les hipòtesis que consideren i els paràmetres que utilitzen. Els models més simples estimen només la distància de parada i/o la velocitat de l'allau. D'altres de més complexes estimen paràmetres com el vector velocitat, la densitat mitjana, la pressió o les condicions de frontera.

1.3.1 Models empírics. Model de Voellmy.

Voellmy fa la hipòtesi que una allau es pot reduir a un flux, de massa m , estacionari a la superfície lliure (figura 1-7). Les forces que actuen sobre el flux són el pes, la component normal, l'angle respecte a l'horitzontal i la força de fregament. Podem escriure l'equació del moviment de l'allau com:

$$m \frac{dv}{dt} = mg + \mathbf{F}_f + \mathbf{N} \quad \text{Eq.1-1}$$

Segons Voellmy, la força de fregaments és la suma d'un de sòlid que ve representat per $\mu mg \cos \alpha$ i un de turbulent que ve representat per $mg \frac{v^2}{R_H \xi}$ on R_H és radi hidràulic (figura 1-8).

L'equació a resoldre és aleshores:

$$\frac{dv}{dt} = g \left(\sin \alpha - \mu \cos \alpha - \frac{v^2}{R_H \xi} \right) \quad \text{Eq.1-3}$$

1.3.2 Models a partir de la mecànica de fluids.

La feblesa principal del model de Voellmy és considerar que una allau es pot reduir al seu centre de masses perquè la velocitat, la densitat, etc. és diferent al llarg del flux. Per a les allaus denses es consideren les lleis generals de la mecànica de fluids a les quals s'afegeixen lleis de comportament com la de Newton (figura 1-9), la de Bingham (figura 1-10) i les dels fluxos granulars (figura 1-11). Per a les allaus aerosols es considera que la turbulència és el factor més important.

2 El moviment en Tractament d'Imatges.

Us recordem que el nostre objectiu és concebre i realitzar una utilitat de tractament d'imatges que ens permeti determinar la distribució de velocitats a la superfície d'un flux de neu. Remarquem que es tracta d'un problema difícil perquè l'objecte que volem estudiar és deformable i de color blanc i es mou sobre un fons que també és blanc. En aquest segon capítol presentem un estudi bibliogràfic dels diferents mètodes de tractament d'imatges per la mesura del moviment i les aplicacions possibles per determinar el desplaçament de les allaus.

2.1 Introducció.

Si busquem la paraula *moviment* al diccionari podem trobar com a definició: "Estat d'un cos la posició del qual respecte a un punt fix canvia contínuament. Desplaçament d'un cos." A partir d'ara utilitzarem indiferentment les paraules *moviment* i *desplaçament*.

Anomenarem anàlisi d'imatges o tractament d'imatges el tractament numèric de senyals bidimensionals. Els mètodes o tècniques utilitzats en tractament d'imatges depenen essencialment de la natura de les imatges a analitzar i de l'objectiu que es fixi l'experimentador.

La modelització de la imatge analògica a partir del seu suport material (tub de càmera TV, matriu CCD, vídeo, etc.) s'obté a partir d'una digitalització o discretització en espai i freqüència. La imatge analògica és aleshores aproximada per valors discrets. Aquests valors s'anomenen píxels.

2.1.1 Generalitats.

L'estudi del moviment pot tenir dos objectius. El primer seria comprendre com l'home percep el moviment. El segon consistiria a utilitzar les informacions del moviment amb la finalitat d'una aplicació concreta.

2.1.2 Problemes generals.

A causa del nostre context d'aplicació (vídeos d'allaus de neu) ens centrarem en els estudis 2D que representen, en general, una projecció del moviment real en 3D.

Siguin quines siguin les etapes tractades per l'estudi del moviment aquestes presenten certes característiques i dificultats comunes. Com a característiques podríem destacar que la informació del moviment és aportada per la lluminància i el color del píxel. Entre els problemes podem destacar que les variacions d'il·luminació poden ser interpretades com a moviment, que cal separar el possible moviment de la càmera del moviment dels objectes de l'escena, que els objectes en moviment amaguen una part del fons o d'altres objectes, o que si objectes uniformes llisquen sobre ells mateixos no es pot detectar res de res.

2.2 Detecció del moviment.

La detecció del moviment és la part més simple de l'estudi del moviment. En aquest cas només es busca la detecció del moviment i en cap cas s'intenta quantificar. Seguidament intentarem descriure el problema de la quantificació.

2.2.1 El problema.

La finalitat és determinar per cada píxel de la imatge si aquest pertany o no a un objecte en moviment. Generalment, associem una variable binària a cada píxel on el valor 1 significa que el píxel està en moviment i el valor 0 el contrari.

Si considerem dues imatges consecutives dins d'una sèrie d'imatges (I_{n-1} i I_n) direm que un píxel està en moviment entre aquestes dues imatges si la intensitat d'aquest ha variat.

Històricament els mètodes de detecció de moviment van aparèixer per aplicacions on la càmera era fixa. Els principals mètodes van ser desenvolupats en aquest context.

Els primers mètodes utilitzaven la modelació estadística de la funció intensitat. Una segona sèrie de mètodes que es va desenvolupar era basat en la utilització d'una imatge de referència. Un tercer tipus treballava amb operadors lògics. I finalment un quart grup utilitzava la teoria general de la modelació markoviana.

2.3 Estimació del moviment.

L'estimació del moviment en el context de les allaus de neu és molt important perquè ens pot permetre conèixer una mica més la dinàmica de les allaus.

A continuació presentem els mètodes espacials (no utilitzen la transformada de Fourier) i els freqüencials (utilitzen la transformada de Fourier).

2.3.1 Mètodes espacials.

Com a mètode espacial considerem el *flot optique*. El *flot optique* és una representació que associa a cada punt elemental d'una imatge, un vector 2D velocitat. Aquest vector representa la projecció en el pla de la velocitat a l'espai real (3D) del punt considerat.

L'algorisme original per poder calcular el *flot optique* es deu a Horn et Schunk (1981). La hipòtesi de la DFD (Displaced Frame Difference) permet escriure:

$$I_n(i, j) = I_{n+1}(i + dx, j + dy) \quad \text{Eq. 2-4}$$

Desenvolupant la formulació matemàtica (fórmules 2-4 fins a 2-9) observem que el vector moviment no pot ser correctament determinat només per una sola component. Així doncs ens cal introduir condicions suplementàries per tal d'aixecar aquesta indeterminació. Horn i Schunk (1988) consideren que les escenes estan sovint compostes d'objectes opacs de talla finita i que es mouen seguint un moviment rígid o una deformació de tipus zoom. Imposen aleshores una condició suplementària que s'expressa intentant minimitzar per cada píxel l'equació següent:

$$E_c^2 = \left(\frac{\partial d_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial d_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial d_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial d_y}{\partial y} \right)^2 \quad \text{Eq. 2-10}$$

Com que la DFD correspon a minimitzar:

$$E_b = I_x dx + I_y dy + I_t. \quad \text{Eq. 2-11}$$

L'energia total a minimitzar serà:

$$E = \sum_{ij} E_b^2 + \alpha^2 E_c^2 \quad \text{Eq. 2-12}$$

Per tal de minimitzar aquesta energia total es poden utilitzar mètodes de regularització clàssica o tècniques sorgides de la modelació markoviana.

2.3.2 Mètodes freqüencials.

Dins dels mètodes freqüencials considerem l'espectre de fases, el cepstre i la correlació d'imatges.

Espectre de fases.

La transformada de Fourier és en general una funció complexa que es pot separar en una part real i en una de complexa. Aquesta funció la podem escriure a partir del seu mòdul i del seu argument com:

$$F(u, v) = |F(u, v)| e^{j \arg[F(u, v)]} \quad \text{Eq. 2-16}$$

El terme $|F(u, v)|$ s'anomena espectre d'amplitud.

El terme $\alpha_f(u, v) = \arg[F(u, v)] = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}[F(u, v)]}{\text{Re}[F(u, v)]} \right]$ s'anomena espectre de fases.

El terme $|F(u, v)|^2$ s'anomena espectre d'energia.

Podem associar el moviment a un decaïment. En aquest cas els espectres d'amplitud i d'energia no es veuen afectats. Només es veu afectat l'espectre de fases, i per tant estudiarem aquest punt.

Considerarem que imatges que provenen d'una filmació en vídeo són imatges de tipus rectangular. Seguint la formulació proposada entre les equacions 2-19 i 2-22 veiem que per aquest cas l'espectre de fases es pot escriure com:

$$\alpha_f(u) = \pi u + \left(1 - \frac{\frac{\text{Sin}(\pi u L)}{\text{Sin}(\pi u)}}{\left| \frac{\text{Sin}(\pi u L)}{\text{Sin}(\pi u)} \right|} \right) \frac{\pi}{2} \quad \text{Eq. 2-24}$$

Cepstre.

Segons Rom (1975) el cepstre d'una funció $f(x, y)$ es pot definir segons l'expressió:

$$C(p, q) = F^{-1} \left\{ \ln |F \{ f(x, y) \}| \right\} \quad \text{Eq. 2-26}$$

On F és la transformada de Fourier i F^{-1} la transformada de Fourier inversa.

Si considerem només un moviment de translació horitzontal d'un objecte i una càmera fixa quan l'objecte es desplaça una distància s a una velocitat constant V

durant el temps d'exposició, la distorsió és unidimensional i la seva PSF (Point Spread Function), h , es pot expressar com:

$$h(x, y; s, t) = h(x - s) = \begin{cases} \frac{1}{VT} \delta(y - t) & 0 \leq x - s \leq VT \\ 0 & \text{la resta} \end{cases} \quad \text{Eq. 2-27}$$

A l'espai de freqüències la funció corresponent al desplaçament (H) és:

$$H(m, n) = \frac{1}{L+1} e^{-j\left(\frac{L\pi}{N}\right)m} \frac{\sin\left(\frac{\pi(L+1)m}{N}\right)}{\sin\left(\frac{\pi m}{N}\right)} \quad \forall n \quad \text{Eq. 2-29}$$

Aquesta funció esdevé zero en línies paral·leles a l'eix n amb una separació entre línies de $N(L+1)$. Aquests zeros ens mostren la presència del desplaçament.

Correlació d'imatges.

Considerem dues imatges consecutives. Prenem el conjunt de píxels d'una finestra de la primera imatge i estudiem tots els desplaçaments possibles d'aquest conjunt en una finestra de la segona imatge. Aleshores farem correspondre a cada desplaçament el valor $\text{Corr}(a, b)$ de la funció de correlació següent:

$$\text{Cor}(a, b) = \sum_A \sum G_1(x, y) G_2(x + a, y + b) \quad \text{Eq. 2-35}$$

La distància del desplaçament l'obtidrem calculant la distància entre el centre del correlograma i el píxel corresponent al valor màxim de la correlació.

3 Estimació de la velocitat en superfície d'una allau densa.

3.1 Introducció.

En aquest capítol presentem com han estat obtingudes les dades experimentals. Seguidament mostrem els resultats obtinguts després de l'aplicació dels mètodes espacials i freqüencials tractats en el capítol anterior.

3.2 Obtenció de les dades.

El camp experimental està situat al *Col du Lautaret* (Alps francesos). Les alçades de sortida de les allaus estan compreses entre els 2.300 i 2.600 m i les zones d'arribada es troben sobre els 2.100 m (imatges 3-1 i 3-2).

Les filmacions de les allaus que ens serveixen com a dades experimentals van estar obtingudes entre els hiverns dels anys 1991 i 1992. Durant la meua estada a Grenoble, del gener del 1994 al desembre del 1996, només vam poder enregistrar tres allaus. Dues l'any 95 i una el 96, però cap d'elles serveix per fer els càlculs de velocitat en superfície d'una allau densa.

Els càlculs fets en aquest capítol han estat realitzats amb l'ajut del programari Dxlmage de la companyia DDS en un ordinador HP-9000.

3.3 Resultats de l'aplicació dels mètodes espacials.

3.3.1 El flot optique.

A la imatge 3-3 es pot apreciar el resultat de l'aplicació dels algorismes del *flot optique* sobre una imatge preparada. En aquesta imatge només estan representats els vectors de norma significativa. Els resultats obtinguts són totalment coherents amb la realitat dels moviments que hi ha a l'escena.

Si apliquem ara el mateix algorisme sobre dues imatges consecutives d'una allau de neu el resultat (imatge 3-4) no és gens satisfactori. Hauríem d'esperar un camp de vectors coherent i els resultats mostren que això no és així.

3.3.2 Conclusions sobre el flot optique.

Els principals culpables que aquest mètode no funcioni són el feble contrast entre l'objecte i el fons i la mateixa naturalesa del fenomen (objecte deformable en moviment).

3.4 Resultats de l'aplicació dels mètodes freqüencials.

3.4.1 Espectre de fases.

Per tal de verificar els algorismes hem desenvolupat una sèrie de tests. Els tests han estat realitzats a partir d'imatges de síntesi, una imatge real digitalitzada i desplaçada artificialment i imatges provinents d'allaus de neu.

Recordem que treballem amb imatges en blanc i negre amb 256 nivells de gris (NG). El 255 correspondria al blanc i el 0 al negre.

Imatges de síntesi.

La primera imatge de síntesi que hem creat i treballat correspon a una imatge negra de 256 x 256 píxels en la qual hi ha un quadrat de color blanc de 22 x 22 píxels al seu centre (imatge 3-5).

Sotmetem aquesta imatge a tres desplaçaments diferents a partir de l'expressió:

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

On $I(x,y)$ és el nivell de gris de la posició (x,y) .

Aquests desplaçaments es poden veure a les imatges 3-6, 3-7 i 3-8. Després apliquem el programa **angleb** (vegeu annex) que ens permet obtenir l'espectre d'energia i l'espectre de fases. Els resultats els podem apreciar entre les imatges 3-9 i 3-14. Aquests resultats permeten mostrar que l'anàlisi de fases fa apreciar clarament els diferents desplaçament, línies més o menys separades, i fins i tot l'orientació dels angles respecte a l'horitzontal. El problema és que tot i que sigui fàcil de detectar visualment és força més complicat de quantificar.

Imatge real digitalitzada.

A la imatge 3-15 a podem veure una imatge real digitalitzada i a la 3-15 b aquesta mateixa imatge però desplaçada artificialment. Els resultats dels espectres d'energia i de fase es troben a les imatges 3-15 c i d. En aquest cas podem observar clarament l'angle d'inclinació a l'espectre d'energia però en canvi a l'espectre de fase l'angle d'inclinació es veu d'una manera molt feble i el desplaçament és impossible de quantificar.

Imatges provinents d'una allau.

L'algorisme és en aquest cas aplicat a tres imatges no consecutives d'una allau de neu. A les imatges 3-16 a, b i c es poden apreciar tres instants diferents d'una allau. A la 3-16 a quan encara no ha arribat el flux, a la 3-16 b el moment en què passa el cos de l'allau i a la 3-16 c la cua de l'allau. Els resultats de l'aplicació del nostre algorisme es poden observar a les imatges 3-17 a i b, 3-18 a i b i 3-19 a i b. En tots els casos l'espectre de fase és molt difícil d'interpretar i és molt més difícil intentar quantificar la velocitat.

A la vista de tots aquests resultats hem de concloure que l'espectre de fase no ens és útil per poder obtenir un camp de velocitats a la superfície d'una allau.

3.4.2 Cepstre.

Hem desenvolupat l'algorisme **cepstrum** (vegeu annex) per tal de poder calcular el cepstre. L'algorisme treballa de la manera següent: agafem una imatge i li practiquem 32 talls horitzontalment; d'aquesta manera tindrem 32 corbes. Seguidament calculem la norma d'aquestes corbes i calculem el logaritme neperià d'aquestes normes i els fem la mitjana. Finalment calculem la inversa de la

transformada de Fourier i obtindrem, en cas de representar el cepstre en funció del desplaçament, un pic molt pronunciat que correspondrà al desplaçament fet inicialment.

Els resultats obtinguts treballant amb la imatge 3-5 es poden veure a les figures 3-1 a i b, els de la imatge 3-15 b a les figures 3-2 a i b, i els de la 3-16 b a les figures 3-3 a i b. Cal dir que els resultats obtinguts per les imatges sintètiques 3-5 i 3-15 b són bastant bons i que ens retornen el desplaçament, però en el moment en què utilitzem imatges reals d'allaus (imatge 3-16 b) veiem que no trobem pics significatius. En resum podem dir que el cepstre tampoc se'ns manifesta útil per tal d'assolir els nostres objectius.

3.4.3 Correlació d'imatges.

En aquest cas la digitalització de les imatges ha estat feta utilitzant una targeta del tipus Matrox (PIP 1024B). Després de digitalitzar les imatges utilitzem el programari C-IMA que ens permet definir una finestra rectangular dins de la imatge estudiada. El programari C-IMA utilitza mètodes de correlació per comparar la informació continguda dins d'aquesta finestra amb la continguda dins de la mateixa finestra però situada en una imatge diferent. El programari busca aleshores la correlació entre aquestes dues finestres d'acord amb els nivells de gris. Finalment el programari presenta els resultats sota la forma d'un correlograma bidimensional i indica per quin desplaçament tenim la millor correlació. Els resultats obtinguts treballant amb dues imatges consecutives d'una allau es poden apreciar a les imatges 3-18 a i b.

A partir d'una sèrie de 250 imatges podem presentar els resultats de la velocitat al centre d'una allau de neu densa (figura 3-4). De totes maneres la precisió obtinguda és totalment insuficient per poder realitzar una cartografia de velocitats. Aquesta imprecisió és deguda bàsicament a una estimació del màxim del correlograma.

3.4.4 Conclusions sobre els mètodes freqüencials

Com a conclusió dels mètodes freqüencials podem dir que a nivell general obtenim millors resultats que aplicant el mètode espacial. Tot i així no ens donen uns resultats que ens permetin assegurar els nostres objectius. Intentarem, doncs, a partir d'ara una metodologia que ens permeti obtenir aquesta cartografia de velocitats. Proposem en el capítol 4 el mètode adaptable que neix intentant millorar el mètode de la correlació d'imatges.

4 Estimació de la velocitat en superfície d'una allau densa. El mètode adaptable.

Presentem en aquest capítol el mètode adaptable. És el mètode més apropiat que nosaltres hem trobat per calcular el camp de velocitats a la superfície d'una allau.

4.1 Introducció.

Cal insistir una vegada més en la dificultat de treballar amb allaus de neu, no només per culpa del perill propi que suposen les allaus sinó a causa de la gran dificultat d'obtenir dades experimentals.

Les pel·lícules de vídeo han estat enregistrades amb una càmera CCD-V5000E (vídeo Hi8 PRO) de SONY que utilitza el mètode PAL. La digitalització de les imatges ha estat feta utilitzant una targeta Media Magic.

4.2 Anàlisi del problema.

La tècnica que nosaltres desenvoluparem es basa en el fet que cada imatge vídeo està constituïda per dues trames que es capten a instants separats de $1/50^{\text{è}}$ de segon. Aquest fet ens permet doblar la resolució temporal de la nostra mostra ja que podem passar de 25 imatges segon a 50.

El desplaçament a causa del temps que l'objectiu de la càmera està obert produeix en tot mètode de correlació una contribució important en el pic central. Aquest fet provoca un ocultament del pic de correlació a causa del desplaçament. Amb la finalitat d'eliminar aquest fet nosaltres treballem amb la resta de les trames. Si restem les trames d'una mateixa imatge n'obtenim una de nova on els nivells de gris caracteritzen les zones de la imatge que han sofert un desplaçament: en blanc les zones que s'han desplaçat, i en negre les zones quietes. Retenim d'aquesta manera en cada imatge les informacions relatives al desplaçament (imatge 4-1).

Ens cal, aleshores, estimar la translació que ens fa passar de la diferència d'una imatge a la diferència de la imatge següent. Per tal de poder fer aquesta estimació utilitzarem un filtre adaptable de Wiener.

4.2.1 Model.

L'anàlisi detallada de les nostres imatges ens ensenya que la degradació pot ser representada per un sistema invariant per translació. Així, la imatge degradada $y(k,l)$ es pot representar per:

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

On $x(k,l)$ és la imatge ideal, $h(k,l)$ és la resposta impulsional de la degradació (la funció de transferència) i $b(k,l)$ és un soroll additiu característic del sistema de degradació.

El problema de la restauració de les imatges és el següent: donada la imatge degradada $y(k,l)$ com es pot obtenir la imatge ideal $x(k,l)$. La funció de transferència, $h(k,l)$, pot ser determinada, ja sigui a partir del fenomen físic que ha provocat la degradació, ja sigui a partir de la imatge degradada. En el nostre cas, nosaltres considerem que la degradació ha estat provocada per un desplaçament línia de l'objecte durant el temps d'obertura de l'objectiu.

Restauració per filtratge invers.

Considerem primer de tot el model (equació 4-1), sense soroll additiu, és a dir $b(k,l)=0$. En aquest cas la transformada de Fourier bidimensional discreta condueix a:

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

Conegudes $y(k,l)$ i $x(k,l)$, podem calcular $Y(m,n)$ i $X(m,n)$. D'aquí:

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

$h(k,l)$ l'obtenim fent la transformada de Fourier inversa.

En presència de soroll l'expressió 4-3 s'escriuria:

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

Restauració per mínims quadrats.

Una altra manera de resoldre el problema de la restauració consisteix a cercar una estimació $h'(k,l)$ de la funció de transferència $h(k,l)$, de tal manera que la mesura de la diferència sigui mínima. El filtre que minimitza l'error quadràtic mitjà

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

en el sentit estadístic s'anomena filtre de Wiener.

Aquí no establirem la resposta freqüencial del filtre de Wiener. Una descripció detallada es troba a Van trees (1968). Aquesta resposta té la forma següent:

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

on $\phi_X(m,n)$ i $\phi_B(m,n)$ són respectivament les densitats espectrals de la imatge ideal i del soroll.

Nosaltres no treballem amb tota una imatge sencera, sinó que treballem amb subfinestres d'una imatge. Així que considerant k subfinestres per a cada imatge, podem escriure la funció de transferència de cada subfinestra com:

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

Si fem la mitjana:

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

D'aquesta manera reduïm la desviació estàndard sobre l'estimació de H .

Si considerem el desplaçament durant el temps d'obertura de l'objectiu com una translació pura, podem escriure la funció de transferència a l'espai de Fourier segons les equacions 2-17 i 2-18 com:

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

Efectuant la transformada de Fourier inversa obtenim:

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

El resultat és una imatge que presenta un pic molt pronunciat que ens assenyala el desplaçament experimentat per l'escena d'una imatge a la imatge següent.

4.2.2 Algorisme del mètode adaptable.

Les diferents etapes del càlcul que es poden apreciar a la figura 4-1 són:

- 1) Utilitzem dues imatges consecutives, la imatge N i la imatge N+1, de 768 x 480 píxels.
- 2) Extraïem les dues trames, la parell i la senar.
- 3) Treballem en una regió definida per un rectangle ($k \times l$) que marca la zona que volem estudiar.
- 4) Treballem amb les diferències:
 - a) Trama Parell – Trama Senar de la imatge N i Trama Parell – Trama Senar de la imatge N+1.
 - b) Trama Parell de la imatge N – Trama Parell de la imatge N+1 i Trama Senar de la imatge N – Trama Senar de la imatge N+1.
- 5) Extraïem de cada diferència n subfinestres ($p \times p$) decalades de m píxels en cadascuna de les dues direccions.
- 6) Realitzem n estimacions de les funcions de transferència $h(x,y)$ de cada diferència.
- 7) Determinem la posició del màxim que ens dóna el desplaçament mitjà dins la regió estudiada. Exemple a la imatge 4-2.
- 8) Cerquem dins de cadascuna de les n funcions de transferència $h(x,y)$ un màxim significatiu al voltant del desplaçament mitjà. Obtenim així una estimació del desplaçament.

4.2.3 Consistència i límits del mètode.

Per verificar la consistència i els límits del nostre algorisme hem creat unes imatges test. Aquestes són rectangles de 768 x 240 píxels que contenen valors de 0 a 255 generats a l'atzar a partir del programari DxlImage (imatge 4-3).

A partir d'aquesta imatge generem una sèrie de set imatges que corresponen a possibles desplaçaments (taula 4-1). Volem verificar si la posició del màxim, després d'aplicar el nostre algorisme, correspon al desplaçament efectuat. Entre les imatges 4-4 i 4-9 podem observar els resultats obtinguts després de fer els càlculs. En tots els casos l'algorisme funciona correctament.

Ara hauríem de poder discriminar de manera automàtica si hi ha hagut moviment o no. Per aconseguir aquesta discriminació proposem tres mètodes:

- 1) Multipliquem la imatge per ella mateixa i després per 1.000 per tal d'augmentar la resolució.
- 2) Multipliquem la imatge per ella mateixa i després assignem valors de 0 a 1.000.
- 3) Fem directament una assignació de valors entre 0 i 255.

A la taula 4-2 es poden apreciar els resultats obtinguts. D'aquesta taula es desprèn que el mètode més eficaç és el primer.

4.2.4 Resultats obtinguts aplicant el mètode adaptable.

Càlcul de la velocitat aparent en superfície (2D).

Presentarem ara els resultats obtinguts utilitzant el mètode adaptable en les allaus del 12 de març de 1991, del 15 de gener de 1992 i del 10 d'abril de 1992.

Hem fet la distinció entre estudi espacial i estudi temporal. Anomenem estudi espacial l'estudi que mostra els vectors desplaçament d'una parella d'imatges consecutives (imatge 4-4). Anomenem estudi temporal aquell que mostra tota la seqüència de l'allau.

4.2.4.1 Estudi espacial.

Agafem una parella d'imatges de l'allau del gener del 1992. Un cop tenim les imatges digitalitzades (768 x 480 píxels) ens cal definir la zona que volem estudiar (imatge 4-10). Per aquestes imatges hem escollit com a zona d'estudi una zona de talla 256 x 320 píxels. A partir d'aquí apliquem el mètode descrit a la figura 4-1. Hem utilitzat subfinestres de 64 x 64 píxels decalades de 16 píxels en cadascuna de les dues direccions. Considerant la zona estudiada (256 x 320 píxels), la talla de les subfinestres i els píxels de decalatge obtenim 13 desplaçaments en el sentit horitzontal i 7 en el sentit vertical. 91 subfinestres en total que ens donen una estimació del desplaçament en 91 punts de la regió estudiada. Aquests desplaçaments són representats per vectors a la imatge 4-11.

A partir d'una mesura de proporció feta sobre la imatge 4-10 obtenim una relació entre la imatge i la realitat de 85 píxels per metre. Això ens condueix a un desplaçament mitjà de 20 cm en 1/25è de segon. La velocitat mitjana corresponent és doncs de 5 m/s.

Després d'aquests resultats aplicarem el mètode a tres allaus: la del març del 1991, la del gener del 1992 i la de l'abril del 1992. Per totes tres allaus hem treballat amb una sèrie de 178 imatges. Els paràmetres utilitzats es poden veure a la taula 4-3, i els resultats a les figures 4-2, 4-3 i 4-4.

4.2.4.2 Estudi temporal.

A partir dels resultats obtinguts en l'estudi espacial hem generalitzat el mètode a l'estudi d'una allau sencera. Una de les principals diferències amb l'estudi espacial és la introducció del soroll. El soroll és degut a petits canvis del nivell de gris de les imatges que pot ser degut a una variació de la lluminositat ambiental o a l'electrònica dels aparells enregistradors.

El tractament desenvolupat a continuació l'hem aplicat a tres allaus encara que aquí només presentem els resultats d'una.

Allau del 12 de març de 1991.

A la imatge 4-18 podem veure un fotograma d'aquesta allau i podem apreciar la zona d'estudi del camp de velocitats i la zona utilitzada per fer el càlcul del soroll.

Per a aquesta allau la talla de la zona estudiada és de 240 x 136 píxels. Les subfinestres són de 128 x 128 píxels i el decalatge de 8 píxels. Obtenim d'aquesta manera 30 subfinestres per imatge. Per a aquesta allau tenim una sèrie de 409 imatges.

A les figures 4-5 i 4-6 podem observar els resultats obtinguts per les subfinestres 1 i 30. I a la figura 4-7 els resultats de les subfinestres 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 i 27.

A la figura 4-8 podem observar el que nosaltres hem anomenat impròpiament velocitat mitjana de l'allau en funció del temps. Aquesta velocitat mitjana d'una imatge serà obtinguda a partir de la contribució de les 30 funcions de transferència de cada imatge.

A la mateixa figura 4-8 podem apreciar clarament les tres zones d'una allau. Al principi l'allau arriba amb una velocitat d'aproximadament 14 m/s. El cos de l'allau passa per la nostra zona d'estudi a una velocitat de 8 m/s. Si considerem que l'error mínim és d'un píxel el salt mínim de la velocitat és de 0,4 m/s. Per tant per velocitats de 18 m/s l'error mínim és del 2,2% i per velocitats de 5 m/s és del 8%.

La figura 4-8 es veu emmascarada per les altes freqüències, i per intentar filtrar-les utilitzarem els filtres de Chebyshev i de Butterworth. A les figures 4-9 i 4-10 presentem el resultat de l'aplicació d'aquests filtres. Finalment, a la figura 4-11 presentem una comparativa entre la velocitat mitjana i els resultats de l'aplicació dels filtres anomenats anteriorment.

Càlcul dels angles dels vectors desplaçament respecte a l'horitzontal.

De la mateixa manera que hem utilitzat els resultats del càlcul dels desplaçaments per obtenir les velocitats, si calculem el mòdul del vector que té per origen el centre de la imatge i per extrem el màxim local de la funció de transferència podem calcular l'angle d'aquest vector desplaçament respecte a l'horitzontal. Així podem arribar a fer una representació de les velocitats i els angles en coordenades polars. En aquesta representació podem observar si existeix alguna direcció privilegiada. A la gràfica de la figura 4-13 hi ha una representació en coordenades polars de les velocitats i dels angles per l'allau del març del 1991. A la figura 4-14 presentem un histograma dels angles. Aquest histograma ens dona que la mitjana està situada al voltant dels 190° , resultat totalment previsible tenint en compte el perfil topogràfic per on passa l'allau.

Correlació entre les gràfiques de les velocitats de les subfinestres.

A priori, en una allau densa podem considerar una certa coherència de les velocitats a la superfície en un instant donat. És a dir, que no existeixen grans diferències de velocitats entre diferents parts de l'allau en el mateix instant. Aleshores, si fem un estudi de les velocitats superficials en diferents zones al llarg

del temps i fem la correlació, els valors obtinguts hauran de ser alts, és a dir, propers a 1.

A continuació ens preguntem si existeix una relació entre les gràfiques; si hi ha correlació entre els resultats de les 30 subfinestres, ja sigui horitzontalment ja sigui verticalment. A la figura 4-15 es pot veure la disposició de les subfinestres per l'estudi de l'allau del març del 91. Recordem de totes maneres que aquestes finestres se superposen. Aquesta superposició es pot observar a la figura 4-16.

Els resultats de les correlacions, horitzontals o verticals, es poden trobar en les taules 4-5, 4-6, 4-7 i 4-8. Podem dir que aquestes correlacions són altes. Existeixen dues causes per aquest fet: d'una banda que les velocitats efectivament són coherents i, de l'altra que el fet que hi hagi superposició de les subfinestres fa augmentar la correlació.

Un estudi similar que el realitzat per a l'allau del 12 de març de 1991 es va fer per a les allaus del 15 de gener de 1992 i del 10 d'abril del mateix any. Els resultats obtinguts per a aquestes dues allaus es poden trobar en el text en francès entre les imatges 4-19 i 4-20, les figures 4-17 i 4-36 i les taules 4-9 i 4-16. Per a l'allau del mes de gener la velocitat màxima és de l'ordre dels 8 m/s, mentre que per a l'allau del mes d'abril la velocitat màxima és de l'ordre dels 15 m/s.

4.2.5 Càlcul de l'alçada de l'allau.

Per poder fer els càlculs de l'alçada de l'allau ens cal la presència de la totalitat del suport dels captadors dins de la imatge. De les tres allaus que teníem a la nostra disposició només l'allau del mes de març del 91 compleix aquest requisit.

Hem aplicat tècniques de tractament d'imatges per tal de calcular l'alçada d'una allau de neu en un punt determinat al llarg del temps. Aquestes tècniques seran explicades en aquest apartat. Per això considerem el suport que es troba en posició perpendicular a l'eix de la càmera com un rectangle (imatge 4-21). Tenim doncs:

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

Amb S, superfície del suport; b, llargada de la base del suport, i h, alçada del suport.

Si considerem la zona corresponent al suport de color negre i la zona corresponent a l'allau de color blanc (imatge 4-22), podem obtenir les fluctuacions de l'alçada respecte a les fluctuacions de l'àrea del suport (fluctuacions al llarg del temps del nombre de píxels negres).

Els resultats queden representats en la figura 4-37. Aquesta figura ens mostra que en el moment en què l'allau passa pel suport el nivell de la neu augmenta fins a dos metres respecte del mantell nival. Després baixa al voltant dels 140 cm i torna

a remuntar fins als 160 cm. Un estudi del vídeo ens mostra que el front arriba en dues onades, i això explicaria els dos pics de la gràfica de l'alçada de neu. Després l'alçada baixa suaument fins a arribar a nivells per sota de zero. Això confirma la hipòtesi que en les allaus de neu densa existeix represa de neu.

Finalment hem intentat veure si hi havia algun tipus de correlació entre la velocitat i l'alçada de l'allau. Per això hem representat a la figura 4-38 els valors normalitzats de la velocitat mitjana i de l'alçada de l'allau. Després a la taula 4-17 es mostra la correlació entre l'alçada i la velocitat. D'aquests resultats es desprèn que existeix una lleugera correlació, però no es pot treure cap conclusió definitiva. Per poder arribar a treure conclusions ens caldria fer correlacions en molt més casos.

4.2.6 Errors i validació de resultats.

El càlcul dels errors inherents a les tècniques de tractament d'imatges és molt difícil de fer. Nosaltres ens guiarem per la qualitat i la puresa de les imatges que són el resultat de l'aplicació de l'algorisme de càlcul de les funcions de transferència. Si tenim dues imatges del mateix fenomen en dos instants diferents, l'algorisme que utilitzem no ens dona sempre una resposta precisa (només un punt), sinó que ens dona un núvol de punts una mica dispersos.

Un error que sí que podem quantificar és l'error lligat a la precisió de l'algorisme. Els resultats es donen amb un error d'un píxel.

Els resultats han estat verificats per a cadascuna de les allaus. Un mètode que ens permet conèixer si els resultats són coherents o no es basa en les verificacions fetes manualment sobre la pantalla. Es tracta del seguiment d'una part coneguda de l'allau entre dues imatges consecutives.

4.3 Conclusió.

Hem posat a punt un mètode de tractament de seqüències d'imatges de vídeo d'allaus de neu densa que ens permet obtenir una estimació ràpida del camp de velocitats a la superfície d'una allau. Aquests resultats ens permeten comparar els resultats teòrics i els experimentals per tal de poder afinar els models numèrics de previsió de riscos.

En general, els resultats de les corbes de les velocitats de les tres allaus estudiades utilitzant el mètode adaptable són similars a les corbes presentades per Gubler (1987) o Marco (1994). Aquestes corbes determinen la presència d'un front de l'allau a una velocitat determinada, un cos on la velocitat baixa gradualment i una cua on la velocitat va baixant fins a arribar a zero.

Constatem també que dins de la zona estudiada, que correspon a una zona canalitzada, el mapa de velocitats superficials és, tal com havíem previst molt uniforme. Observem velocitats més grans al centre de la canal que a les vores, incloent-hi l'error de la profunditat de camp, perquè estem treballant en 2D.

5 Altres mètodes de tractament d'imatges per a l'estudi de les allaus: estimació de la variació del contorn d'una allau.

L'estudi que presentem a continuació consisteix a establir un algorisme que ens permeti seguir l'evolució del contorn d'una allau a partir d'una seqüència d'imatges de vídeo.

Diferents investigacions han estat realitzades fins avui per tal de perseguir la traça d'un objecte deformable al llarg d'una seqüència. Aquests treballs difereixen els uns dels altres per les diferents expressions matemàtiques de la informació de la imatge o dels models de deformació.

En aquest capítol presentem un model que utilitza els contorns actius (Kass, 1987) per estudiar el moviment del front d'una allau de neu. Aquest model considera les característiques de l'allau i la naturalesa de les imatges. Precisament, tal com dèiem en el capítol anterior, la principal dificultat és deguda a la mateixa naturalesa de les imatges. Recordem que les imatges han estat enregistrades en condicions reals; és a dir, treballem a l'exterior amb unes condicions atmosfèriques que no podem controlar. Treballem sense poder optimitzar la llum, ni la distància de la càmera a l'objecte.

5.1 Detecció de la zona de l'allau per diferència d'imatges.

L'idea més simple en el moment que volem detectar un objecte en moviment en una escena fixa és la de restar d'una imatge de l'escena sense objecte una imatge on volem detectar els objectes.

En aquest cas treballem amb una sèrie d'imatges de vídeo d'una allau de neu pols provocada artificialment el 15 de febrer de 1996 a la *Vallée de la Sionne* (Suïssa). A la figura 5-1 es pot veure el resultat, agafant només un tall, d'una diferència de la imatge 5-1 amb una imatge sense allau. Es poden distingir entre els píxels 200 i 400 dos pics, un de 40 i un de -60. El pic de la dreta correspon a l'ombra creada per l'allau; el pic de l'esquerra correspon a una zona fortament il·luminada visible

a la imatge 5-1. A partir d'ara no es considera només la diferència sinó que es calcula el valor absolut d'aquesta. Resumint, el tractament que es fa és el següent:

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

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

$I_{ij}(t)$ és el nivell de gris del píxel de coordenades (i,j) de la imatge en el temps t.

$I_{ij}(0)$ és el nivell de gris del píxel de coordenades (i,j) de la imatge sense allau.

$D_{ij}(t)$ és la imatge que busquem. Correspon a la imatge de les zones en moviment.

5.2 Detecció dels contorns actius.

Existeix una gran varietat de mètodes de detecció dels contorns actius. D'un autor a l'altre el que varia és la definició del terme energètic i com aquest es minimitza.

Mètode de Kass.

Kass i al., (1987) van ser els primers a presentar els contorns actius o *snakes*. Un *snake* és una corba tancada o no, iniciada a prop del contorn a detectar i que convergeix cap a ell. S'associa una energia global, $E(C)$, a aquest contorn que es descompon en dos termes: una energia interna, E_{int} , a l'*snake* que imposa la continuïtat i curvatura regular del contorn, i una energia externa, E_{ext} , lligada a les característiques de la imatge (al gradient del nivell de gris). El que s'acaba fent és minimitzar la funció definida per $E(C) = E_{int}(C) + E_{ext}(C)$.

Mètode de la bombolla.

Mètode proposat per Cohen (1990). Més que utilitzar una energia directament lligada al gradient de la imatge, Cohen proposa la utilització de detectors de frontera com els detectors de Canny-Deriche. El nom de bombolla prové del comportament de la força de dilatació que Cohen afegeix per tal de modificar la força deguda al gradient. Aquesta força de dilatació està definida perpendicularment al contorn de cadascun dels seus punts.

Mètode discret.

El mètode que nosaltres utilitzarem és el mètode discret (Planet i al., 1999). Aquest mètode és totalment discret contràriament als mètodes proposats per Kass o Cohen. Considerem que els punts del contorn tenen posicions senceres i que no varien si no és de píxel en píxel.

L'expressió de l'energia en aquest cas es redueix a:

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

- L'energia externa, E_{image} , s'obté a partir del nivell de gris de la imatge.
- L'energia interna, E_{curv} , d'un punt del contorn és definida com una espècie de curvatura del mateix punt.
- El paràmetre α ens permet ponderar la importància de la contribució de l'energia de la imatge dins del terme energètic.

Algorisme de convergència.

El contorn s'inicialitza al més a prop possible de la solució de tal manera que envolta totalment el contorn real. Tot seguit iterem l'algorisme següent un cert nombre de vegades:

- Calculem les energies tal com hem descrit anteriorment.
- Un contorn en el temps t ha d'estar inclòs dins del contorn en el temps $t+1$. Utilitzem per a cada píxel del contorn un veïnatge de recerca al llarg de la normal a la frontera del contorn (figura 5-4). La nova posició del punt en el temps $t+1$ s'obté utilitzant l'equació 5-13.
- Es netegen els punts confusos dels bucles i s'assegura una distància *inter* constant entre els punts afegint o suprimint punts.

Una bona elecció del paràmetre α és indispensable per a la convergència de l'algorisme. Per a cada seqüència d'imatges cal determinar aquest paràmetre α . Els resultats obtinguts considerant $\alpha=0.0005$ i $\alpha=0.00001$ són presentats a les imatges 5-2, 5-3, 5-4 i 5-5. Els millors resultats en aquest cas s'obtenen prenent $\alpha=0.0005$.

Els perfils energètics (figures 5-5 i 5-6) ens mostren l'evolució de l'energia associada al contorn en els casos anteriors.

Tot seguit utilitzarem el mètode discret que acabem de descriure i els contorns deformables amb l'objectiu de fer un seguiment temporal dels contorns d'una allau.

5.3 Seguiment temporal dels contorns d'una allau.

Els mètodes per tal de fer el seguiment temporal dels contorns d'una allau es fonamenten en el principi següent: detectar l'objecte (el contorn de l'allau) i aplicar una deformació a aquest contorn per poder permetre la seva recerca en la imatge següent.

Una allau no és un objecte rígid sinó que ben al contrari, és una espècie de núvol, en el cas d'una allau de neu pols, o un fluid, en el cas d'allaus denses. Per culpa del pendent el contorn es desplaça cap avall i es va escampant.

El principi de l'algorisme recursiu està representat en les figures 5-7 i 5-8. Per a cada imatge de la sèrie dilatam n passos el contorn de l'allau (figura 5-8) obtingut de la imatge precedent de tal manera que envolti el contorn que busquem.

Apliquem aleshores de manera iterativa l'algorisme de contorn actiu descrit en el mètode discret.

5.3.1 Resultats de l'algorisme de seguiment.

Apliquem ara l'algorisme a una sèrie d'imatges d'allaus de neu.

Allau del 15 de febrer de 1996.

Per a aquesta allau, provocada artificialment a la *Vallée de la Sionne* (Suïssa), disposem d'una sèrie de 60 imatges. Els resultats obtinguts es poden veure a les figures 5-12 i 5-13. Presentem també tres imatges. La primera (imatge 5-6) correspon a l'inici de la seqüència; a la imatge 5-7 podem veure el contorn corresponent a la imatge número 23 de la sèrie, i a la imatge 5-8 podem veure l'amplitud màxima de l'allau i tot i així el contorn encara és molt precís.

Allau del 24 de gener de 1995.

En aquest cas presentem una allau provocada artificialment al *Col du Lautaret* (Alps francesos). Disposem per a aquesta allau d'una sèrie de 240 imatges. Els resultats queden plasmats en les figures 5-14 i 5-15. A la imatge 5-9 podem veure l'instant de l'explosió causant de l'allau; a les imatges 5-10, 5-11 i 5-12 es presenten tres contorns a tres instants diferents. Finalment, a la imatge 5-13 es presenta l'evolució del front de l'allau al llarg del temps.

5.3.2 Interpretació i conclusions sobre l'algorisme de seguiment.

En vista dels resultats presentats podem extreure les conclusions següents:

- L'evolució global és bona però localment imprecisa. La interpretació al llarg del temps (imatge 5-13) ens ajuda a comprendre les variacions de velocitat o els canvis de pendent.
- El seguiment és molt sensible a l'elecció dels paràmetres. Hi ha força paràmetres, d'entre els quals en destaquem tres: el pes de l'energia de la imatge (α), el nombre de dilatació (n) i el coeficient associat al mapa de distàncies (λ).

5.4 Conclusions de l'estimació del contorn d'una allau.

L'extracció de paràmetres d'una seqüència d'imatges d'una allau és complicada. Les imatges filmades en un medi natural presenten un nivell de soroll molt elevat. La distància de l'allau a la càmera i les condicions climàtiques en el moment de les filmacions (per exemple la convecció deguda a l'escalfament de la neu) donen com a resultat seqüències difícils d'analitzar.

L'algorisme elaborat per fer el seguiment utilitza principalment els contorns actius i funciona correctament per les seqüències d'allaus de neu pols que teníem a la nostra disposició.

El càlcul de la velocitat del front que està sotmès a les imprecisions de l'estimació del contorn és força delicat. Cal de totes maneres tractar el contorn obtingut per tal de fer-lo proporcional al contorn real. És per això que el coneixement exacte de les condicions de l'obtenció de les dades és important, en particular la distància focal, el pendent i alguns punts de referència sobre el terreny.

6 Comparació entre els resultats del Seguiment dels Contorns, la Sísmica i els Models Numèrics.

Com ja s'ha dit a la introducció aquesta tesi ha estat realitzada dins el marc d'un projecte europeu que agrupava 14 laboratoris de 7 països diferents, tots ells dedicats a l'estudi de la neu en general. D'entre els diferents estudis que es realitzen en el camp de les allaus, ens fixarem en els estudis dels models numèrics fets per M. Naain al Cemagref, i en els estudis dels senyals sísmics fets per F. Sabot i E. Suriñach al Departament de Geodinàmica i Geofísica de la Universitat de Barcelona. En aquest capítol ens interessem per aquests dos temes ja que volem presentar els resultats de la comparació d'aquests dos mètodes amb els resultats obtinguts utilitzant el tractament d'imatges.

En aquest capítol farem una comparació entre els contorns d'una allau obtinguts a partir del tractament d'imatges, els senyals sísmics provocats per l'allau i els resultats de l'aplicació dels models numèrics per tal de millorar la caracterització del fenomen de les allaus.

Les imatges obtingudes de l'allau provocada artificialment i les dades sísmiques van ser enregistrades simultàniament.

Localització i mesures.

El camp experimental està situat a l'estació d'esquí de Boí Taüll (Pirineus catalans). L'allau que estudiarem (Raspes Roies) va ser desencadenada utilitzant explosius l'hivern del 1996. La sortida de l'allau va estar a 2.725 m, i la longitud va ser de 840 m amb un desnivell de 500 m (figura 6-1).

6.1 Tractament d'imatges.

Els resultats obtinguts aplicant els algorismes del capítol 5 es poden apreciar a les imatges 6-1, 6-2 i 6-3. Els contorns calculats per l'algorisme resulten de fet una projecció del contorn de l'allau sobre el pla imatge de la càmera.

6.2 Estudi dels senyals sísmics.

St. Lawrence i Williams (1976) van ser els primers que van utilitzar mètodes sísmics per estudiar les allaus de neu. Ells van demostrar que les allaus provoquen un senyal sísmic característic que es pot distingir dels senyals sísmics produïts per altres fonts. Els primers treballs realitzats al CEN (Centre d'Etudes de la Neige) van permetre diferenciar senyals sísmics provocats per les allaus dels provocats pels terratrèmols. Pel que fa als Pirineus catalans va ser instal·lada pel SGC (Servei Geològic de Catalunya) amb col·laboració amb el Departament de Geodinàmica i Geofísica de la UB una estació sísmica automàtica dedicada a l'enregistrament dels senyals sísmics de les allaus l'any 1988. Des d'aquell moment el Departament de Geodinàmica i Geofísica treballa des de diferents àmbits les allaus de neu.

La importància dels estudis sísmics de les allaus està justificada perquè a partir d'ells podrem caracteritzar les allaus. La finalitat d'aquests estudis és el control de l'activitat de les allaus en zones isolades, o en situacions meteorològiques en què l'observació de les allaus es fa impossible. Per tal d'aprofundir en els coneixements dels senyals sísmics, les dades sísmiques i les imatges d'allaus desencadenades artificialment van ser enregistrades simultàniament. Això ens permet controlar una part de la informació (durada de l'allau, perfil de la velocitat mitjana, evolució temporal de l'allau) que és impossible d'obtenir quan les allaus es desencadenen de manera natural.

L'estació sísmica utilitzada per enregistrar el senyal sísmic de l'allau estava situada enfront de la canal a 1.500 m de distància del punt d'explosió. L'enregistrament sísmic va ser realitzat per un equip sísmic estàndard. Els senyals van ser obtinguts amb una freqüència de 100 mostres per segon.

A la figura 6-2 presentem l'enregistrament sísmic obtingut durant l'allau de Raspes Roies a l'estació d'esquí de Boí Taüll.

L'estudi sísmic que es realitza al Departament de Geodinàmica i Geofísica consisteix en (Suriñach i al, 1999):

- La determinació del moviment del sòl, la conversió de mV a m/s, el control del soroll sísmic del lloc experimental abans, durant i després de l'experimentació en els dominis de freqüència i de temps.
- La determinació de les característiques sísmiques del lloc (estimació de la velocitat de propagació i els possibles efectes locals).
- Identificació dels diferents trens d'ones de l'allau en relació amb les imatges de vídeo (domini temporal).
- L'anàlisi freqüencial de les diferents parts del senyal de l'allau.
- L'estudi del moviment de les partícules per cada tren d'ones.

Comparació imatge de vídeo – senyal sísmic.

El primer treball que es va fer va ser la sincronització del temps zero del senyal sísmic amb la visualització de l'inici de l'explosió sobre les imatges de vídeo. La comparació de les imatges de vídeo i del senyal sísmic corresponent permet determinar l'origen de cada tren d'ones. Per això és necessari decalar en el temps el senyal sísmic tenint en compte la velocitat de les ones que es propaguen per terra.

Les ones sísmiques generades per l'allau de Raspes Roies es mostren a la figura 6-3. Durant els primers 20 segons després de l'explosió no s'observa cap creixement de l'amplitud de les ones que sigui suficient per ser atribuït a l'allau. El tren d'ones d'una durada de 12 segons correspon a les imatges on l'allau comença a desenvolupar un aerosol en produir-se un canvi de pendent de la topografia (1 a la figura 6-3). Aquest canvi de pendent és visible en el mapa de pendents de la zona (figura 6-1). En aquesta part, l'allau arriba a la seva velocitat màxima i es comença a formar un aerosol. Els trens d'ones de la darrera part del senyal corresponen a les imatges de la fase de frenada de l'allau (2 a la figura 6-3).

Els resultats d'aquesta comparació suggereixen que les particularitats dels senyals sísmics enregistrats corresponen a les modificacions en el tipus de flux de l'allau i a les modificacions del pendent al llarg del recorregut, a interaccions amb obstacles i als processos associats a la fase d'aturada de l'allau.

6.3 Models numèrics.

Alguns models numèrics posats a punt per M. Naaim preveuen la trajectòria de l'allau a partir de dades topogràfiques i nivològiques. Podrem aleshores comparar els contorns obtinguts per la simulació numèrica i els obtinguts per tractament d'imatges.

Naaim i Ancey (1995) consideren que una allau és un flux granular dens que pot ser simulat utilitzant un model 2D i adoptant la formulació següent per al terme de fricció:

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

A partir de l'equació 6-1 podem descriure nombrosos models, com el model de Bingham, el d'un fluid granular o el d'un model de fluid de Voellmy. Les equacions integrals no lineals del balanç de masses i dels moments per un flux dens es poden escriure com:

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

On h és l'alçada del flux en un punt determinat, $\mathbf{u}_d = (u, v)^T$ la velocitat del flux, θ_x i θ_y són els angles del pendent del terreny en les direccions x i y respectivament, i i k és el coeficient de pressió.

La resolució numèrica del sistema d'equacions s'obté després d'ajustar els diferents paràmetres que depenen de la qualitat de la neu.

A la figura 6-4 podem veure l'evolució de la velocitat mitjana i la velocitat màxima calculades sobre la totalitat de l'allau a partir dels models numèrics. La figura 6-5 presenta els resultats de l'evolució dels contorns de l'allau al llarg del temps i a la figura 6-6 podem apreciar el dipòsit de l'allau de Raspes Roies obtingut per simulació numèrica.

La semblança entre els contorns de la simulació numèrica de l'allau (figura 6-5) i els contorns obtinguts a partir de les imatges de vídeo (imatge 6-3) és palesa. Encara que no haguem fet el canvi de 2D a 3D es confirma la viabilitat del model utilitzat.

6.4 Conclusions.

A una mateixa allau, la de Raspes Roies, hem aplicat tres mètodes d'anàlisi diferents: l'anàlisi d'imatges de vídeo, les mesures sísmiques i el modelatge numèric.

Respecte a la utilitat dels resultats del tractament d'imatges en el domini de la sismologia cal destacar com a molt important l'explicació del senyal sísmic a partir de l'observació de les imatges.

Respecte a la utilitat dels resultats del tractament d'imatges en el domini del modelatge numèric cal destacar com a més important la possibilitat de comparar els resultats dels contorns reals i aquells contorns que provenen dels models.

Conclusions.

Al principi, aquest treball tenia per objectiu contribuir al desenvolupament dels coneixements en el domini de la dinàmica de les allaus. Els mètodes presentats, la cartografia de les velocitats en superfície, l'estimació del contorn d'una allau i la comparació entre la imatge, els models numèrics i la sísmica, poden inscriure's en un marc molt més ampli.

Després d'haver provat diferents mètodes clàssics de tractament d'imatges per tal de construir un mapa de velocitats superficials en una allau densa, constatem que el mètode adaptable dona els millors resultats. Aquest mètode ens permet fer, automàticament, un càlcul de velocitats a la superfície d'una allau. Paral·lelament hem desenvolupat un mètode pel càlcul de l'alçada d'una allau en un punt de l'espai al llarg de tota l'allau. Finalment hem desenvolupat un mètode que permet fer una estimació de la variació del contorn d'una allau al llarg del temps.

Pel que fa a les conclusions de la part corresponent a la comparació entre els resultats obtinguts per tractament d'imatges, la sísmica i els models numèrics d'allaus, podem dir que no era un objectiu inicial d'aquest treball. És un primer pas i calen molts més exemples experimentals per treure conclusions.

Tot i que hem exposat resultats, no s'ha d'oblidar que un treball on la part experimental és a l'aire lliure presenta certes dificultats. La primera seria la impossibilitat de controlar les condicions experimentals i per tant la dificultat de repetir exactament les mateixes experiències com podríem fer en laboratori. Una segona seria la dificultat de l'obtenció de les dades experimentals (enregistraments de vídeo) ja que es tracta d'un fenomen estacional. L'última dificultat remarcable és que les imatges són, inevitablement, poc contrastades.

Com a principals perspectives podem destacar:

Seria interessant millorar el mètode adaptable aplicat al càlcul del camp de velocitats en la superfície d'una allau, sobretot en la part dedicada a recollir informació de l'existència o no del moviment. La finalitat seria l'automatització del procés per decidir si hi ha hagut moviment o no.

Una altra proposta de millora seria passar del càlcul de velocitats en 2D a 3D. Per aconseguir això ens cal equipar les zones experimentals amb punts de referència i efectuar aixecaments topogràfics.

La creació d'una interfície que permetés a partir d'una sèrie d'imatges digitalitzades calcular la cartografia de velocitats, l'alçada de l'allau i el seguiment dels contorns ajudaria qualsevol persona a treballar fàcilment en aquest domini.

Una altra via de treball s'obre davant la possibilitat d'aprofundir en els coneixements de la comparació imatge – sísmica – models, i verificar si existeix una relació més enllà de la simple comparació qualitativa.

Tenint en compte els resultats obtinguts per les allaus de neu, es pot exportar aquesta metodologia a altres fenòmens com les laves torrencials.

Per portar a terme totes aquestes perspectives sobretot el que calen són més dades experimentals.

Per acabar caldria recordar que es tracta de la primera vegada que mètodes de tractament d'imatges són utilitzats per extreure informacions relatives a la dinàmica de les allaus a partir de simples enregistraments de vídeo. És a partir dels estudis que van començar amb la utilització del vídeo que, actualment, en totes les experiències de dinàmica d'allaus s'utilitzen enregistraments de vídeo sincronitzats en el temps amb els altres instruments.

Techniques d'imagerie pour la
détermination du champ de vitesses à la
surface d'une avalanche.

Texte en français.

Introduction.

Les avalanches de neiges sont un phénomène naturel avec un risque associé qui ne cesse d'augmenter dans ces dernières années (rappelons les avalanches de 1996 dans les Pyrénées et en 1999 dans les Alpes). La conséquence de ce risque est l'utilisation massive des zones de montagne due à l'occupation du territoire par l'expansion de la population, les voies de communication, ou les activités en rapport avec le ski et la haute montagne en général. Il est pourtant nécessaire d'essayer de mitiger les conséquences négatives de ce risque naturel à partir de la détection, la prévention, et la réduction de l'impact que les avalanches de neige provoquent dans l'environnement.

L'étude des risques naturels et plus précisément du mouvement des matériaux naturels (neige ou laves torrentielles, par exemple), et la recherche de moyens pour les caractériser, sont des sujets récents de programmes de recherche au niveau européen.

Essentiellement, les questions posées sont la connaissance du site (cartographie d'avalanches), la période de récurrence des avalanches d'une grandeur déterminée, les conditions nivo-météorologiques ainsi que les causes physiques «favorables» pour son déclenchement, et les mesures à appliquer pour réduire les effets négatifs sur la vie humaine et les propriétés.

La complexité du problème oblige à tenir en compte le plus grand nombre de cas connus, de telle façon qu'on puisse considérer les différents paramètres qui contrôlent ce phénomène naturel. Cela a mené à chercher une collaboration entre différents collectifs provenant de plusieurs pays qui travaillent sur les écoulements avalancheux.

Ce travail de thèse démarre sous le projet européen Capital Humain et Mobilité (Contribution à l'étude de la dynamique des avalanches dans un but de cartographie du risque et formation à la modélisation dans le domaine des phénomènes naturels).

C'est dans le cadre de ce projet que j'ai commencé l'étude des avalanches pendant l'hiver de 1994. Cette année là, le *Departament de Geodinàmica i Geofísica* (Université de Barcelone) me proposa de réaliser une étude sur l'application du traitement d'images sur les avalanches de neige à Grenoble, au sein des laboratoires du LIME et du Cemagref. Ce travail est recueilli dans cette mémoire.

Une fois terminé le projet européen Capital Humain et Mobilité, la prolongation naturelle de ces travaux est passée à un autre projet européen, le SAME (Snow Avalanche Modelling and Warning in Europe). Les objectifs de ce programme

furent la prévention de ce risque naturel, la prévision des avalanches et la diminution de leurs effets négatifs.

Le programme SAME a uni différents laboratoires européens spécialisés dans tous les domaines scientifiques et techniques qui interviennent dans les mouvements naturels et les risques associés. On trouve ainsi l'étude des propriétés physiques des différents types de matériaux qui vont du fluide aux matériaux granulaires en passant par la neige. Les études sur la dynamique et la modélisation des écoulements sont effectuées sur les avalanches de neige. La difficulté de ce genre d'études est l'obtention de mesures et d'observations permettant de valider des modèles de dynamique et d'évaluation des risques. Les méthodes instrumentales actuellement utilisées sont très lourdes en raison des conditions expérimentales difficiles (haute montagne, phénomènes de très grande ampleur mettant en jeu des énergies considérables avec risque de destruction des systèmes d'observation).

Dans le cadre du projet SAME il a existé une collaboration entre le LIME, le Cemagref et l'Université de Barcelone afin d'exploiter les données provenant du traitement des images, de la modélisation numérique et des enregistrements sismiques.

Le but du projet européen SAME était de prévenir et de réduire les pertes humaines et matérielles dues au phénomène naturel des avalanches. Atteindre cet objectif a demandé une mise en commun des expériences acquises par tous les pays confrontés à ce risque, dans les domaines de la cartographie des zones avalancheuses, de la prévention et de la modélisation des avalanches. Il existait une collaboration en termes humains et matériels entre les 14 laboratoires de 7 pays différents impliqués dans le projet. Entre les différentes tâches du projet on peut signaler la coordination de l'activité des sites expérimentaux et la validation des modèles numériques et mettre au point des capteurs de mesure des caractéristiques des avalanches

Le LIME (Laboratoire d'Instrumentation de Micro-informatique et d'Électronique) était un laboratoire de l'Université Joseph Fourier de Grenoble spécialisé dans les applications de l'électronique et de l'informatique à la physique, et plus particulièrement à la physique des phénomènes naturels. Aujourd'hui, le LIME a été réabsorbé par d'autres centres de l'Université Joseph Fourier. Dans le LIME, mon travail consistait à développer un outil qui me permettait soustraire information sur la dynamique des avalanches à partir des enregistrements vidéo. En essence, il s'agit de développer et appliquer des algorithmes informatiques qui nous permettent d'atteindre nos objectifs à partir de données obtenues expérimentalement.

Depuis 1972, la Division Nivologie du Cemagref (Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts) a réalisé de nombreuses campagnes de mesures sur le site expérimental du Col du Lautaret (Hautes-Alpes). Au Cemagref, j'ai développé la partie expérimentale de la mémoire, c'est-à-dire, l'obtention des données. Celles-ci sont, dans ce cas là, les enregistrements vidéo des avalanches de neige. Il faut remarquer les difficultés que cela

représente comme le fait que les avalanches sont un phénomène saisonnier, qu'on travaille dans des conditions extrêmes (haute montagne et basses températures), et l'impossibilité de contrôler et de répéter les conditions expérimentales.

Cette mémoire s'encadre dans les recherches du *Departament de Geodinàmica i Geofísica* qui, depuis 1986, définit comme un des sujets de ces recherches l'étude des avalanches de neige.

C'est pendant la saison hivernale 1986-87 que fut initiée (depuis *l'Universitat de Barcelona* et le *Servei Geològic de Catalunya*) l'étude du risque d'avalanches aux Pyrénées catalanes. Ce projet avait pour objectif aborder les connaissances du phénomène des avalanches et son impact comme risque naturel, avec comme objectif le développement d'un système de prédiction dans le temps et dans l'espace.

La saison 1996-97 a marqué le 10ème anniversaire du Projet d'Etude du Risque d'Avalanches aux Pyrénées catalanes. Ce fait a coïncidé avec la consolidation des travaux faits par le *Servei Geològic de Catalunya* dans les domaines de la prédiction du risque d'avalanches et la production de cartes d'avalanches.

Depuis le début le travail réalisé par le *Servei Geològic* et le *Departament de Geodinàmica i Geofísica* a consisté à acquérir et transmettre une formation basique, et à établir et développer les principes et les lignes de travail du Projet.

Actuellement le *Departament de Geodinàmica i Geofísica* a réorienté son travail vers des domaines plus directement en rapport avec la recherche.

Il s'agit de concevoir et de réaliser un outil de traitement des images permettant déterminer la distribution des vitesses à la surface d'un écoulement de neige. Cette étude est l'une des composantes qui permettra analyser le mécanisme d'écoulement des fluides, la morphologie de l'écoulement, et par la suite affiner les modèles permettant estimer les risques en fonction de la topographie du terrain. La première phase de l'étude a consisté en un rapport bibliographique sur les méthodes de cartographie de vitesses utilisées dans différents domaines qui vont de la météorologie à la physique atomique. Ceci nous a permis de faire le point sur l'état de l'art de cette recherche appliquée au milieu naturel et pouvoir constater qu'il n'y avait pas de cartographie de vitesses d'avalanches de neige faites à partir du traitement d'images. Donc, notre premier objectif est réaliser une cartographie de vitesses d'un écoulement avalancheux à partir d'images extraites d'un film vidéo. Un deuxième objectif a été de réaliser la détection puis le suivi de l'enveloppe d'une avalanche. Ce second objectif est très différent. Il s'agit là de l'étude de mouvement d'une avalanche à l'échelle "macroscopique", tandis que le premier objectif est une étude du mouvement à l'échelle "microscopique".

D'autre part les images vidéo dont nous disposons pour exécuter une étude par traitement d'image nécessitent la mise en place d'un matériel simple et assez flexible pour pouvoir numériser les images reprises sur un support quelconque.

Un ensemble de logiciels a été développé pour permettre le traitement d'une séquence d'images, et fournir une cartographie des vitesses en tout point de la surface de l'écoulement et le suivi du contour de l'enveloppe d'une avalanche.

Le fil conducteur du travail est l'utilisation des techniques de traitement d'images appliquées aux avalanches de neige. Pour cela ont été traités des films vidéo d'avalanches déclenchées artificiellement au Col du Lautaret (Hautes-Alpes), à la Vallée de la Sionne (Suisse) et à Boí Taüll (Catalogne).

Ce document est divisé en six parties.

La première partie, chapitre 1, présente de façon très résumée une introduction aux propriétés physiques de la neige, aux avalanches de neige, et aux modèles numériques afin d'établir le cadre général où le travail va se développer.

Dans une deuxième partie, chapitre 2, nous faisons rapidement un état de l'art des techniques d'analyse de mouvement en traitement d'images. Nous rappellerons les principes de la détection du mouvement, l'estimation du mouvement, en présentant les méthodes spatiales comme le flot optique, et les méthodes fréquentielles, comme le spectre de phases, le cepstre et l'intercorrélation d'images.

La troisième partie, chapitre 3, est une mise en pratique des théories développées dans le chapitre 2. Nous parlerons des conditions de prises de vues in situ et nous analysons les résultats obtenus en appliquant les différentes méthodologies exposées dans le deuxième chapitre, lesquelles se révèlent peu efficaces pour atteindre nos objectifs.

Dans la quatrième partie, chapitre 4, nous présenterons la méthode qui est devenue la plus efficace pour résoudre notre premier objectif qui, je le rappelle, est obtenir une cartographie des vitesses en surface d'une avalanche. Cette méthode est la *méthode adaptative* qui est basée en un filtrage de Wiener. Dans ce chapitre nous présentons le développement théorique et les résultats obtenus en appliquant cette méthode.

Dans le cinquième chapitre nous abordons le second objectif de ce travail : l'estimation de la variation de l'enveloppe d'une avalanche en utilisant les contours actifs. Nous présentons, aussi, les résultats obtenus à partir de cette méthodologie.

Finalement dans la sixième partie, chapitre 6, nous montrons une première approche de l'utilisation des résultats obtenus en utilisant le traitement d'images dans les domaines de la sismique et le modèles numériques des avalanches.

Enfin une conclusion générale synthétise l'ensemble du travail et une série d'annexes complète les différentes parties de ce document.

1 Neige, Avalanches et Modèles Numériques.

Dans ce premier chapitre, nous ferons un rappel des principales propriétés physiques de la neige. Puis, nous présenterons les différents types d'avalanche et leurs caractéristiques ainsi que les principaux modèles numériques existants. Mon intention n'est pas de donner un traité exhaustif sur la neige, compte tenu de la bibliographie dédiée exclusivement à ce sujet. Par contre, je crois que rappeler quelques notions sur la neige et les avalanches peuvent aider le lecteur à se situer dans le cadre global où se déroule ce travail de recherche.

1.1 Propriétés physiques de la neige.

La neige est un matériau poreux, mélange de glace, d'air et parfois d'eau liquide. Ce matériau possède des propriétés physiques spécifiques.

La densité ou masse volumique de la neige.

La densité ou masse volumique de la neige est la quantité de masse de neige par unité de volume. Elle s'exprime en kg/m^3 . Elle peut varier entre 20 kg/m^3 , pour une neige fraîche et 550 kg/m^3 pour une vieille neige. En revanche, la densité ou masse volumique du gel est de 917 kg/m^3 (Rey, 1976).

La masse volumique de la neige fraîche dépend fortement des conditions de vent et de température, au moment de la chute de neige, et la masse volumique de la neige déposée au sol dépend de son degré de vieillissement et de son humidité.

Le TEL (Tenue en Eau Liquide).

Si la neige contient de l'eau liquide on dit qu'il s'agit de neige humide. On détermine l'humidité de la neige en faisant le rapport, volume d'eau liquide, volume total de neige. On obtient ainsi la teneur en eau liquide (TEL). La TEL caractérise la quantité d'eau libre contenue dans la neige à 0°C . La TEL ne dépasse pas 0.09. Au-dessus de cette valeur, l'eau s'écoule à travers la neige.

La cohésion de la neige.

Liaison plus ou moins forte entre les cristaux de neige, conférant à l'ensemble une certaine résistance à la rupture (SAME, 2000). Il y a une forte relation entre la cohésion et la résistance de la neige. Elle dépend de la qualité des liaisons entre les grains. Selon Sergent (1993), on distingue quatre types de cohésion :

La cohésion de Feutrage.

La cohésion frêle des cristaux de neige fraîche ou des particules reconnaissables, est due à l'imbrication de leurs aspérités et dendrites. Elle est fragile et disparaît vite dès qu'il y a métamorphose.

La cohésion de Frittage.

Elle concerne essentiellement les grains fins. Ce type de cohésion existe grâce à la présence de ponts de glace entre les grains. Ces ponts sont le fruit de la condensation solide de vapeur d'eau aux points de contact entre les grains. Il s'agit d'une cohésion assez forte, mais elle facilite la propagation d'une ligne de fracture.

La cohésion Capillaire.

Elle est obtenue par la présence d'une pellicule d'eau qui entoure les grains et assure la liaison entre eux. Sa qualité dépend de la quantité d'eau de la neige. Cette cohésion diminue si la TEL augmente. Pour de faibles valeurs de la TEL, la cohésion est bonne. Pour une TEL élevée, la neige perd, au contraire, toute sa cohésion.

La cohésion de Regel.

Lorsque l'eau liquide présente dans la neige gèle, les grains se soudent. Cette cohésion est très forte, elle peut favoriser l'apparition de couches de regel d'une importante épaisseur (décimétriques). Il s'agit de la cohésion la plus stable. Elle est étroitement liée aux conditions de température.

La résistance à la compression, à la traction et au cisaillement.

En statique, la neige peut être considérée comme un matériel plastique et visqueux (Salm, 1983). La neige peut se déformer jusqu'à la destruction des cristaux de neige, à ce moment là, la couche de neige se rompt. Cette limite sert à définir la résistance de la neige. La résistance de la neige dépend du type de neige (forme des grains, structure, densité et cohésion), de son état (température et humidité) et de la vitesse de la déformation (Salm, 1983).

Chaque élément du manteau neigeux situé sur une pente peut être soumis à des efforts de compression, traction et cisaillement (McClung et Schaerer, 1993 ; Föhn, 1995). Sur la figure 1-1, nous présentons un schéma qui montre les efforts de compression, traction et cisaillement dans le manteau.

La neige résiste assez bien à la compression mais très mal à la traction. Sur les pentes, les zones de convexité sont des zones de traction et les concavités sont des zones de compression (figure 1-1). La neige est donc un matériau compressible et ceci, d'autant plus qu'elle est récente et de masse volumique faible.

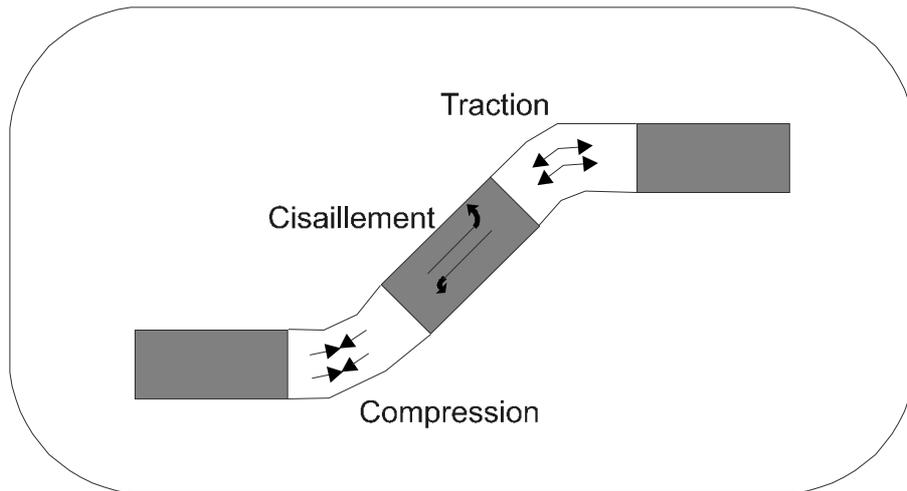


Figure 1-1. Schéma de la compression, la traction et le cisaillement.

La plasticité et la viscosité de la neige.

Suivant son niveau de métamorphose et de sa température, la neige peut se déformer plus ou moins bien sans rupture, plasticité de la neige, ou s'écouler plus ou moins facilement sur une pente, viscosité de la neige. Les différences de viscosité des diverses strates de neiges qui composent le manteau neigeux induisent des vitesses de glissement différentes sur les pentes.

Le bilan énergétique.

Le manteau neigeux est un ensemble de différents strates homogènes formé de neiges différentes, dont la métamorphose est étroitement liée aux échanges énergétiques avec l'atmosphère et le sol.

Le flux thermique de sol.

La terre maintient en permanence un flux d'énergie à la base du manteau neigeux par l'intermédiaire du 'flux thermique de sol' (Sergent, 1993). Cet apport de chaleur permet de maintenir la base du manteau neigeux à 0°C, mais il est insuffisant pour provoquer sa fusion par la base. Sur la figure 1-2, nous montrons l'action du flux thermique de sol à la base du manteau neigeux.

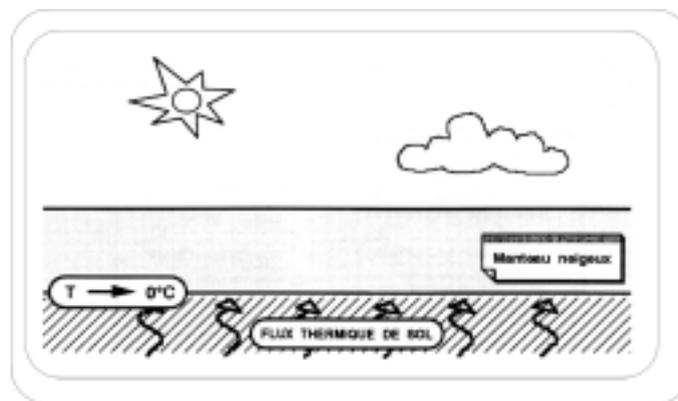


Figure 1-2. Action du flux thermique de sol à la base du manteau neigeux. Selon Sergent, 1993.

Le rayonnement solaire et l'albédo.

La presque totalité de l'énergie solaire incidente sur la neige (99 %) est une radiation d'onde courte (rayonnements ultraviolets, lumière visible, et infrarouge), entre 0.3 et 3 μm du spectre électromagnétique.

Le rayonnement solaire arrive à la surface de la neige directement, et indirectement à cause de la diffusion de la radiation provoquée par l'atmosphère et les nuages. Le manteau neigeux renvoie vers l'atmosphère une grande partie de ce rayonnement et absorbe l'autre partie qui contribue à son échauffement. La figure 1-3 montre un schéma de l'interaction entre le rayonnement solaire et la neige.

L'albédo est définie comme la capacité de réflexion d'un corps, et s'exprime par la relation **Albédo = rayonnement réfléchi / rayonnement incident**, il s'agit d'une magnitude addimensionnelle, et sa valeur est comprise entre 0 et 1. On parle d'albédo spectral si l'on considère une longueur d'onde donnée, et d'albédo global, si l'on considère toutes les longueurs d'onde.

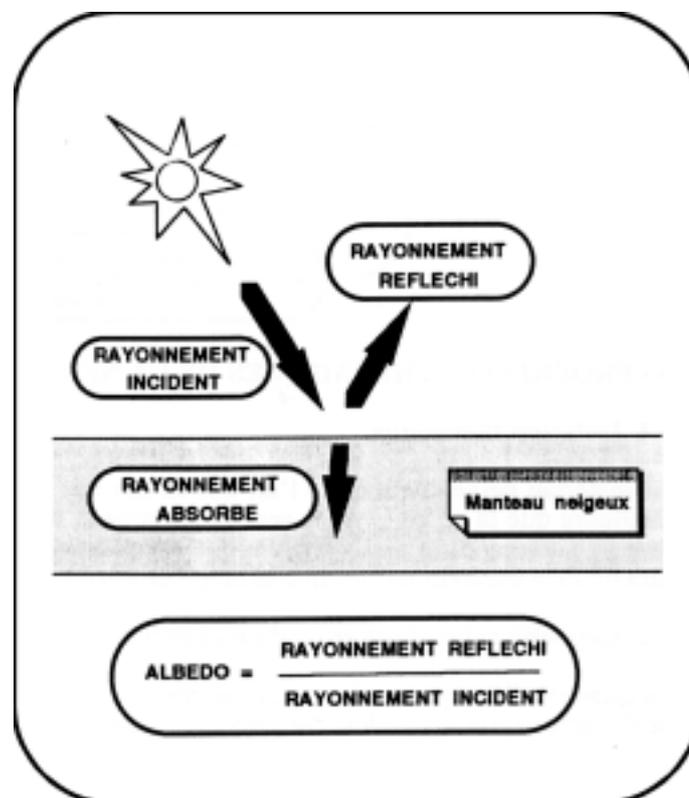


Figure 1-3. Interaction rayonnement solaire / neige. Selon Sergent, 1993.

L'albédo de la neige est fortement dépendant de la longueur d'onde, de la taille du grain et de la quantité d'impuretés qu'elle contient. La figure 1-4 nous montre l'albédo pour différents diamètres de grains en fonction de la longueur d'onde. Les longueurs d'onde qui correspondent à l'ultraviolet (0,01 à 0,4 μm) et à la lumière blanche (0,4 à 0,7 μm) ont un albédo très élevé. L'albédo diminue fortement pour les infrarouges (0,7 à 100 μm). On trouve aussi que plus la taille du grain est petite et moins grande la quantité d'impuretés, plus grand sera l'albédo. On a donc, pour une neige récente un albédo de 0.9, et un albédo de 0.5 pour une vieille neige (Wiscombe et Warren, 1980; Sergent, 1995; Gubler, 1995).

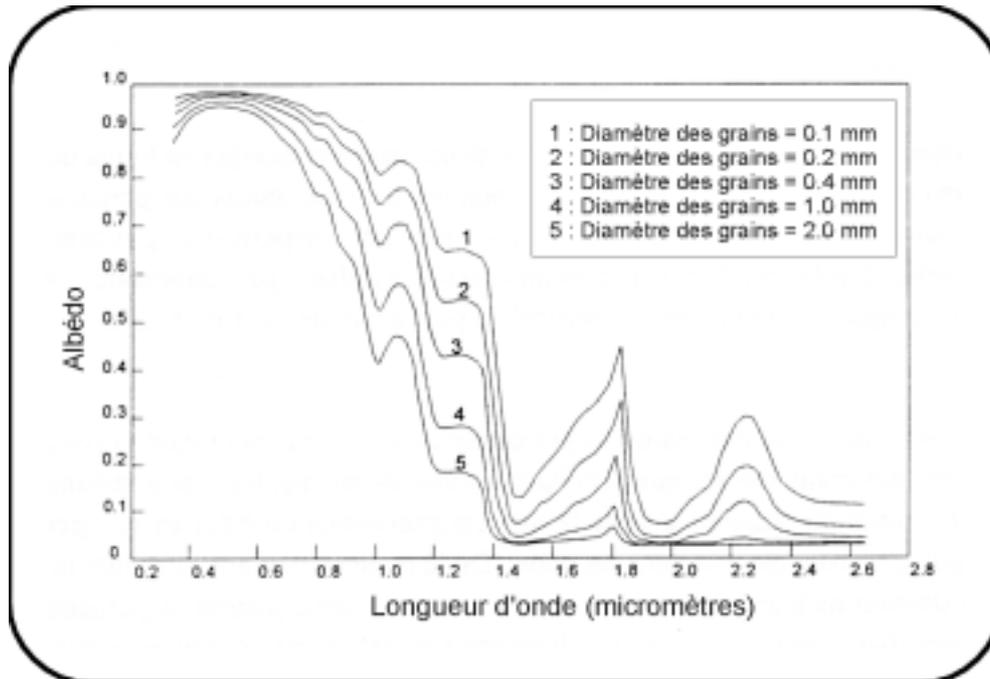


Figure 1-4. Albédo en fonction de la longueur d'onde pour différents diamètres de grains.

Le coefficient d'absorption.

Le coefficient d'absorption nous sert à définir le taux d'absorption de radiation solaire par le manteau neigeux. Comme l'albédo, le coefficient d'absorption dépend de la longueur d'onde, de la taille du grain, de la densité et des impuretés présentes dans la neige. Mais au contraire de l'albédo, le coefficient d'absorption est faible pour la lumière visible (0,4 à 0,7 μm) et l'ultraviolet (0,01 à 0,4 μm), et élevé pour l'infrarouge (0,7 à 100 μm). Il diminue aussi si la taille du grain ou la densité augmentent, et augmente si la quantité d'impuretés présentes augmente.

Le rayonnement thermique.

La neige, comme tous les corps, émet en permanence un rayonnement infrarouge. La neige se comporte comme un 'corps noir'. Grâce aux longueurs d'onde issues de l'infrarouge thermique (10 μm), la neige présente une émissivité proche de 1 (Sergent, 1993; Sergent, 1995; Gubler, 1995).

L'émissivité dépend de la température du corps et de la longueur d'onde, et on peut l'exprimer comme :

$$\text{émissivité} = \frac{\text{énergie irradiée par le corps}}{\text{énergie irradiée par un corps noir}}$$

L'émissivité est une magnitude addimensionnelle, et sa valeur est comprise entre 0 et 1.

Cette émission de rayonnement thermique provoque une perte d'énergie de la neige, un abaissement de la température et en conséquence un refroidissement

de la surface du manteau neigeux. Ce refroidissement peut être compensé par le rayonnement solaire, par le rayonnement thermique en provenance des nuages ou de l'atmosphère, ou par l'action des vents chauds en contact avec le manteau neigeux.

On retrouve ainsi, pendant les nuits claires et sans vent un fort refroidissement de la surface du manteau neigeux. Par contre, s'il y a des nuages, de l'humidité, ou du vent chaud, par rapport à la surface de la neige, les transferts de chaleur sont compensés et il n'y a pas d'abaissement important de la température de la neige en surface.

La température de l'air, humidité, vent, pluie et neige.

La surface du manteau neigeux peut se réchauffer ou se refroidir en contact avec l'air, selon la différence de température entre les deux milieux, l'humidité de l'air et la vitesse du vent qui a pour effet d'accélérer les échanges.

Les précipitations sous forme liquide, ont pour effet d'humidifier le manteau neigeux, et l'énergie qu'elles apportent sert à réchauffer la neige. La fusion provoquée par la pluie est peu importante, par contre elle provoque un fort tassement du manteau en facilitant la métamorphose de fonte (Sergent, 1993). Si la précipitation a lieu sous forme solide, cela provoque essentiellement une surcharge du manteau. Nous vous présentons sur la figure 1-5 un schéma qui résume les échanges neige – atmosphère.

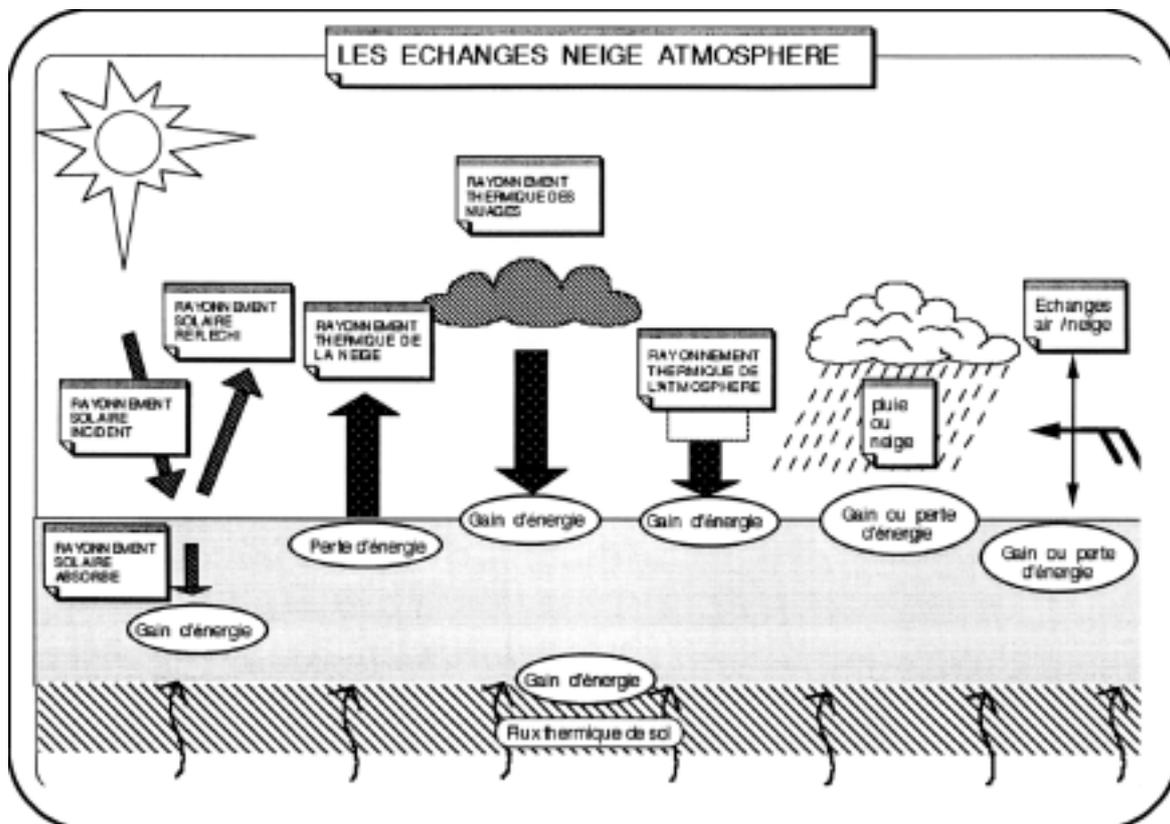


Figure 1-5. Les échanges neige - atmosphère. Selon Sergent, 1993.

1.2 Les Avalanches.

Donner une définition précise du terme avalanche est assez compliqué, tant le phénomène est complexe, multiforme et s'étend sur des échelles de temps et d'espace très variables. Dans un premier temps, on peut se contenter d'énoncer qu'il s'agit d'un écoulement rapide de neige sur une pente de montagne, faisant suite à une rupture, déformation fragile et ductile, d'un équilibre mécanique au sein du manteau neigeux. L'échelle de temps varie entre quelques secondes et quelques minutes. L'échelle dimensionnelle, la longueur de l'écoulement, peut varier entre une dizaine de mètres et quelques kilomètres. Le volume engagé de neige s'étend de quelques mètres cubes à des millions, tandis que l'inclinaison de la pente va, en moyenne, de 28° à 50° , à l'exception des grands «slush», avalanches de neige fondante, qui sont déclenchés à partir de pentes de 15° en inclinaison. Pour comprendre mieux le phénomène avalancheux, il est nécessaire de classifier d'une manière très générale quelques unes de leurs caractéristiques. Il est facile de distinguer deux classes extrêmes d'écoulement :

- *l'avalanche coulante* : c'est le déplacement d'une masse de neige le long du sol. L'écoulement est astreint à suivre le relief. La hauteur de l'écoulement est de l'ordre du mètre.

- *l'avalanche en aérosol* : c'est un écoulement rapide de neige sous la forme d'un nuage, qui résulte du mélange de l'air et des particules de neige dont un noyau de neige dense. Cet aérosol est composé de grandes bouffées turbulentes, dont la trajectoire n'est pas entièrement déterminée par le relief. La hauteur de l'écoulement est de l'ordre de la dizaine de mètres.

Il existe une gamme variée d'avalanches répondant, au cours de leur écoulement, à la fois à des critères distinctifs des avalanches coulantes et des aérosols. C'est cette grande variété dans les caractéristiques des écoulements observés qui rend extrêmement difficile la mise en place d'une classification des avalanches. Il existe de classifications comme celles de l'UNESCO, (Quervain et al., 1973), ou celle de Rapin et Pahaut (2000). Quervain et al. (1973) se réfèrent aux propriétés et à l'apparence de l'avalanche aussi bien que la morphologie de son écoulement sur chaque partie de son parcours, et Rapin et Pahaut (2000) fait référence aux différentes zones de l'écoulement, aux critères dans chaque zone, et aux caractères distinctifs de chaque critère.

Dans cette partie nous allons essayer de définir les mécanismes qui interviennent dans la formation des avalanches. La compréhension des phénomènes mécaniques qui expliquent le déclenchement des avalanches est très complexe parce qu'il existe un nombre important de neiges aux propriétés mécaniques très différentes et qui, de plus, évoluent avec le temps.

La déformation lente du manteau neigeux.

Les efforts appliqués au manteau neigeux et ses propriétés de plasticité et viscosité conduisent à un mouvement et à une déformation du manteau. Cette déformation dépend aussi du poids de la neige et de la topographie du terrain. On peut la décomposer en reptation, tassement et fluage, et glissement.

La Reptation.

La reptation est la déformation interne et lente du manteau neigeux qui résulte du tassement de la neige et du fluage (SAME, 2000). La reptation est progresser par des mouvements du corps qui prend appui par sa face inférieure. Le manteau neigeux est constamment en reptation, car des métamorphismes se produisent constamment entraînant une réorganisation des grains de neige. Par rapport à d'autres matériaux, le taux de reptation de la neige est très élevé pour deux raisons, sa porosité élevée, qui permet le mouvement et la réorganisation des grains, et parce que c'est un matériau qui se trouve très proche de son point de fusion. En fait, le taux de reptation augmente de façon exponentielle avec la hausse de la température (McClung et Schaerer, 1993; Furdada, 1996). Sur la figure 1-6, un schéma très simplifié qui résume les différentes forces qui interviennent dans l'équilibre du manteau neigeux.

On peut décomposer la reptation en une composante de tassement et un autre de fluage. (Voir figure 1-6).

- *Le tassement.*

Le tassement est la diminution d'épaisseur du manteau neigeux sans qu'il y ait de fonte (SAME, 2000). Le tassement de la neige est provoqué par la composante de son poids perpendiculaire au sol. Le tassement est maximal quand le terrain est horizontal, et provoque une compression et une densification du manteau. Ainsi, plus la pente est forte, moins la compression est élevée. Le tassement a tendance à augmenter d'une part la cohésion et l'angle de frottement entre les différentes couches et d'autre part la résistance au cisaillement. (Voir figure 1-6).

- *Le fluage.*

Mouvements internes entre couches de neige (SAME, 2000). Le fluage de la neige est la déformation sans rupture provoquée par la composante de son poids parallèle au sol. Plus la pente est forte plus importante est cette déformation. On peut l'associer à un effort de cisaillement. (Voir figure 1-6).

La relation entre le tassement et le fluage dépend du type de neige et de la pente. Les deux composantes ont le même ordre de magnitude pour des versants avec pentes favorables au déclenchement d'avalanches. Pour une neige de faible densité, avec pentes de 25° à 45°, la déformation par fluage peut arriver à représenter de 60% à 90% de la déformation totale par reptation (McClung et Schaerer, 1993).

Le glissement.

Le glissement est la deuxième composante de la déformation du manteau neigeux (figure 1-6). Le glissement peut se produire sur une surface lisse à la base du manteau neigeux (herbe ou roche), mais aussi entre différentes couches de neige.

Les conditions favorables au glissement sont : l'existence d'une interphase lisse ou de faible friction, le fait que la température de l'interphase soit proche à 0°C et que la pente soit plus grande que 15° (McClung et Schaerer, 1993).

La présence d'eau joue un rôle important : elle submerge les petites rugosités du sol (ou de la couche inférieure) et en diminue la friction ; d'un autre côté, elle diminue aussi la viscosité, et, en conséquence, augmente le glissement.

La vitesse de reptation peut être de quelques millimètres par jour à la surface d'un manteau d'un à deux mètres d'épaisseur. Mais, parfois, le glissement peut atteindre plusieurs mètres par jour (Salm, 1983).

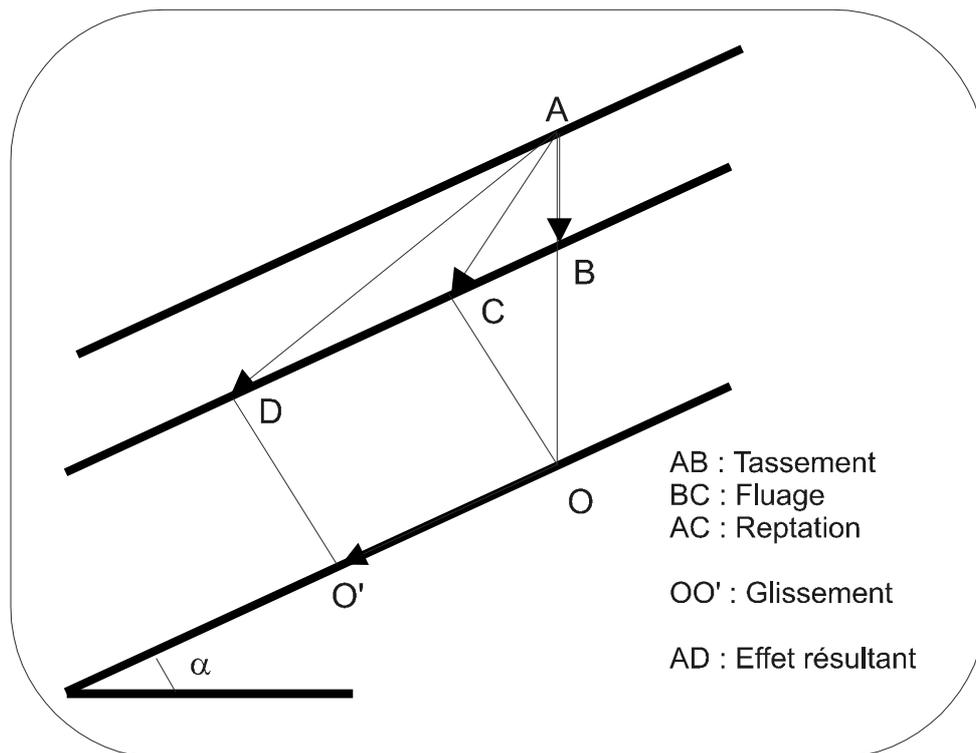


Figure 1-6. Décomposition des mouvements de la neige en un versant. Selon Sergent, 1993. α angle de la pente. OO' sol.

Les facteurs de déclenchement.

Les différents paramètres qui peuvent déclencher une avalanche se divisent en trois catégories. En général, il s'agit des paramètres qui provoquent une instabilité du manteau de neige :

Les paramètres météorologiques.

On peut citer :

- *Les précipitations.*

Le poids de nouvelles chutes de pluie ou de neige risque de compromettre l'équilibre du manteau neigeux. La pluie, si elle est suffisamment abondante, pourra avoir le même effet que l'eau de fonte sur la stabilité du manteau neigeux (percolation, accumulation dans des zones de rétention et ruissellement sur une couche imperméable).

- *Le vent.*

Sur une neige légère et non consolidée, l'effet combiné de transformations mécaniques des cristaux, de répartition inégale du manteau neigeux et de reprise des cristaux déposés au sol augmentera localement le risque de déclenchement naturel ou accidentel d'avalanches.

- *La température de l'air.*

Proche ou supérieure à 0°C, elle agit sur la couche de surface et conduit à des coulées superficielles, ou des avalanches de fonte. Lorsqu'elle est nettement négative, elle conduit à la mise en place de métamorphoses et facilite l'apparition de grains de faibles cohésions. De plus les températures froides, en retardant le tassement des couches de neige fraîche, maintiennent longtemps le risque de déclenchement d'avalanches de neige récente.

Comme il a été dit précédemment, la température de l'air n'est pas le seul élément qui intervient sur le bilan thermique du manteau, il faut également citer : l'humidité de l'air, la nébulosité, l'orientation du versant, le vent. Ces différents facteurs météorologiques se combinent assez souvent entre eux pour déterminer une situation avalancheuse.

Les paramètres nivologiques.

Des paramètres internes au manteau neigeux expliquent aussi souvent les déclenchements d'avalanches. Apparition de sous-couches sans cohésion, présence d'interstrates fragiles (résistant mal au cisaillement et propices au glissement), mauvaise adhérence d'une chute de neige sur une surface lisse, film d'eau s'accumulant au-dessus de couches imperméables, ...

Les paramètres du terrain.

Le risque de déclenchement peut s'aggraver à cause de certains paramètres liés au terrain :

- *Le profil de la pente. La morphologie du terrain.*

Une pente convexe, la traction exercée sur le manteau est alors au maximum, augmente le risque de déclenchement.

- *L'Orientation du versant.*

Le tassement est plus rapide en versant Sud (plus exposés au soleil), mais avec le risque de coulées de neige mouillée. En versant Nord, la neige reste plus souvent froide, sans cohésion. Le risque de déclenchement persiste longtemps.

- *L'état du sol. La rugosité.*

Certains états du sol favorisent également les départs d'avalanches comme les herbes, ou les grandes dalles lisses.

- *Végétation.*

La végétation peu haute, comme les arbustes, s'oppose au tassement des premières chutes de neige, l'ancrage inférieur du manteau neigeux est mal assuré et il y a risque de rupture lorsque le poids de la neige fera plier les branches. Si la forêt est suffisamment dense, elle favorise l'ancrage du manteau neigeux et freine les effets du vent.

Les caractéristiques de l'écoulement.

L'avalanche est un écoulement gravitaire rapide. De manière générale, la masse d'une avalanche quelconque varie au cours de l'écoulement : le bilan de masse peut être positif (reprise de neige), négatif (dépôt) ou bien neutre (c'est qui est le plus souvent supposé) et il peut évoluer durant l'écoulement (par exemple, passer de positif à négatif). Généralement, le mode de déplacement de la neige, la morphologie de l'écoulement et les mécanismes de transfert de masse diffèrent totalement entre un aérosol et une avalanche coulante (Marco, 1994).

- *Les avalanches en aérosol.*

L'avalanche en aérosol est un écoulement très fortement turbulent d'un mélange d'air et de particules de glace dans l'atmosphère. L'aérosol s'apparente à un *courant de turbidité* : un fluide lourd s'écoule le long d'une pente dans un fluide plus léger (Hopfinger, 1983). A priori, le matériau est diphasique, car phases solide et gazeuse peuvent avoir leur propre vitesse. Il est cependant probable, que dans le cas de régimes caractérisés par de faibles nombres de Stokes il soit licite de considérer le milieu comme monophasique. En effet, pour des aérosols purs, la turbulence permet le brassage rapide du mélange d'air et de particules de glace ; la suspension est donc généralement relativement homogène. Cela n'est plus vrai durant la phase d'arrêt et autour d'obstacles (Hermann et al., 1993).

On observe qu'un aérosol est composé de grandes structures tourbillonnaires qui se déplacent très rapidement (vitesse entre 30 et 100 m/s) et peuvent croître sur des hauteurs très importantes (plusieurs dizaines de mètres). On a également noté l'apparition de grandes volutes au niveau du front de l'écoulement, agissant comme de véritables rouleaux de convection. On présume que ce sont les frottements avec l'air qui donnent cette forme si particulière.

La dynamique de ces écoulements semble étroitement liée au phénomène de reprise, c'est-à-dire à l'incorporation par l'avalanche de la neige en place sur la zone d'écoulement.

- *Les avalanches coulantes.*

L'avalanche coulante est un écoulement dense de neige. Sa morphologie est relativement simple et n'est pas sans rappeler des laves torrentielles ou volcaniques. Généralement, une coupe en long de l'avalanche (à un moment donné) permet d'identifier les parties successives appelées front, corps, et queue de l'avalanche. On note généralement (pour des phénomènes d'ampleur suffisante) un accroissement du corps durant la phase de mise en mouvement puis une diminution progressive jusqu'à sa disparition au moment de l'arrêt. Il est à noter que le front n'a pas de rôle dynamique particulier, c'est simplement le contour aval de l'avalanche.

La cinématique au sein de l'écoulement dépend largement de la nature du matériau transporté. Pour l'instant, les données disponibles issues d'observations de terrain montrent :

- Le caractère plutôt laminaire de l'écoulement (faibles fluctuations des vitesses et de la surface libre).
- Un profil de vitesse selon la hauteur en forme de *plug* ou bien presque pas cisailé (Maeno, 1993).
- La possibilité d'une vitesse de glissement (sur une surface neigeuse) (Gubler, 1993 ; Granada et al., 1995).

Ces observations sont confortées par des expériences de laboratoire comme celles de Dent et Lang (1983), où le mouvement d'un paquet de neige sur un plan incliné a été étudié ou, les simulations des avalanches en utilisant balles de ping-pong réalisées par Keller et al. (1998) et Nishimura et al. (1998).

De même que pour les aérosols, le phénomène de reprise joue un rôle important, mais encore mal compris. Selon une hypothèse communément partagée, la neige est mise en mouvement par cisaillement du manteau neigeux au passage de l'avalanche ou bien par suite d'une rupture provoquée par la surcharge imposée par l'avalanche (Marco, 1994 ; Ancey, 1996). L'augmentation de masse est sans doute à même d'accélérer l'écoulement (à travers l'augmentation de l'énergie cinétique).

Enfin, il est intéressant de noter que des mesures *in situ* ont mis en évidence une augmentation de la température de la neige au cours de l'écoulement : ainsi la différence de température entre la zone de départ (avant l'avalanche) et le dépôt de neige laissé par l'avalanche peut être sensible (Eybert-Bérard et al., 1978).

La nature du matériel mobilisé.

La neige mobilisée par une avalanche présente des caractéristiques très différentes de la neige au repos.

Cas des aérosols.

Dans le cas d'un aérosol, le matériau en écoulement est une suspension de particules de glace dans l'air. La concentration volumique en glace ne dépasse pas 5%. La taille des particules est souvent de l'ordre du millimètre. La masse volumique du mélange est de quelques dizaines de kg/m^3 . La vitesse de chute des particules, de l'ordre du mètre par seconde, est négligeable devant la vitesse caractéristique de l'avalanche qui dépasse la dizaine de mètres par seconde, ce qui semble autoriser à considérer le matériau comme une suspension homogène (Batchelor, 1989). Durant la phase d'écoulement, on peut raisonnablement considérer que l'aérosol est un fluide newtonien présentant un caractère turbulent (Marco, 1994).

Cas des avalanches coulantes.

Dans le cas d'une avalanche coulante, le matériau est un mélange de neige (particules de glace) et d'air, avec parfois la présence d'eau sous forme liquide. La concentration volumique en neige devient importante : la masse volumique du mélange est généralement comprise entre 200 et 700 kg/m^3 . Le matériau est généralement compressible surtout à cause de la grande compressibilité de la neige elle-même mais également parfois à cause du caractère dilatant du matériau lorsque celui-ci se présente sous forme de boules de neige. Ainsi, il n'est pas rare de voir la masse volumique du matériau tripler entre la mise en mouvement de l'avalanche et son arrêt (Eybert-Bérard et al., 1978).

La rhéologie des mélanges air/neige est extrêmement complexe, car la neige est un milieu thermodynamique très sensible : puisque 0°C est le point triple de l'eau, les trois phases peuvent coexister pour cette température et on peut assister à des variations importantes de la composition du système pour des faibles variations de température autour du point triple. Il semble dès lors probable que le comportement mécanique soit très dépendant de l'état thermodynamique et de la structure du mélange. Cette sensibilité thermodynamique du mélange air/neige explique la grande variété d'aspect du matériau mobilisé dans une avalanche coulante : pulvérulent (neige sèche), granulaire (boules de neige agglomérée par effet capillaire ou compactage, blocs anguleux provenant des restes de la dislocation du manteau neigeux), pâteux (mélange d'eau et de neige) et quasiment toutes les formes intermédiaires entre ces aspects particuliers. Un cas souvent rencontré concerne les avalanches mobilisant des boules de neige. La mise en boule de la neige est caractéristique de la présence d'eau sous forme liquide (celle-ci peut exister dans la neige mobilisée ou bien apparaître en cours d'écoulement). Le matériau s'apparente alors à un milieu granulaire avec, en général, une granulométrie très étendue. Toutefois, l'analogie avec un simple

milieu granulaire doit être maniée avec prudence car la neige sous forme de boules possède certaines caractéristiques dont les mécanismes et l'influence sur le comportement mécanique global restent très mal cernés (Marco, 1994).

La diversité morphologique des matériaux observés, leur grande sensibilité thermodynamique ainsi que les échelles de taille rencontrées semblent actuellement rendre rédhitoire toute étude rhéométrique approfondie de la neige mobilisée par les avalanches coulantes. Cette grande complexité explique le très faible nombre d'études expérimentales sur le sujet ainsi que leur caractère très lacunaire et contestable. On peut par exemple citer la détermination d'une viscosité apparente par l'équipe japonaise de Maeno et de Nishimura (Nishimura et al., 1987). D'après ces auteurs, la neige est un fluide non-newtonien à seuil, pour lequel la viscosité apparente ne dépend que faiblement de la température (de l'air), mais fortement de la masse volumique (Maeno, 1993).

En revanche, même si peu de travaux rhéométrique sont été réalisés, plusieurs lois de comportement ont été proposées sur le plan théorique et sont justifiées plus ou moins qualitativement : fluide newtonien, fluide newtonien généralisé (Reiner-Ericksen), fluide à seuil (Bingham) et fluide bivisqueux.

Le mouvement ou la dynamique des avalanches.

On peut distinguer trois étapes lors du mouvement des avalanches: la première, où se trouve la neige dont la mise en mouvement est à l'origine de l'avalanche; la deuxième, l'accélération et conservation de la vitesse de la masse de neige en mouvement; et la troisième, de la décélération et l'arrêt. Ces trois étapes correspondent aux zones de départ, de transition (ou d'écoulement) et de dépôt.

La zone de départ.

Une avalanche, au début, peut être de plaque ou sans cohésion. S'il s'agit d'une avalanche de plaque, au cours de la trajectoire, cette plaque se fracture en morceaux chaque fois plus petits. Selon la dureté de la plaque initiale et la longueur de la trajectoire, il est possible de maintenir des morceaux jusqu'à la zone de dépôt ou ces morceaux peuvent se fracturer complètement (McClung et Schaerer, 1993).

En les avalanches de plaque la cassure est toujours linéaire, très nette et peut se propager très vite, en fonction de la cohésion de la neige. La fracture est parfois étendue et dépend de la topographie du terrain.

En les avalanches de neige récente le départ est ponctuel, donc la masse de neige en mouvement provoque le déséquilibre des couches latérales.

En les avalanches de fonte en général, le départ est ponctuel, mais il peut arriver que l'on trouve des cassures linéaires, car l'humidification des couches n'est pas toujours homogène et des cohésions peuvent encore persister localement. Les pentes les plus exposées au soleil seront les premières à se déclencher.

La zone de transition.

La zone de transition, pour les grandes avalanches, se situe dans une pente variant de 28° et 10° de la partie la plus haute jusqu'à la plus basse. À cause de la forte pente, l'accélération de l'avalanche est rapide.

À cause de la vitesse relativement élevée, dans cette zone de la trajectoire, l'avalanche est peu sensible aux petites irrégularités du terrain.

La zone de dépôt.

Dans cette zone la pente est en général, faible ($\leq 10^\circ$) et a tendance à diminuer. On arrive, donc, à l'angle de friction dynamique de la neige en mouvement, la décélération de l'avalanche devient par conséquent rapide. La vitesse diminue et l'avalanche devient sensible aux irrégularités du terrain (McClung et Schearer, 1993).

Le dépôt des avalanches est très variable. S'il s'agit de neige sèche, on peut avoir un étalement de la zone d'arrêt dans un large périmètre avec un dépôt d'épaisseur assez homogène est souvent peu visible. Néanmoins, il arrive que certains blocs sont visibles si la plaque initiale est très résistante et cohésive. Si l'avalanche est initialement composée de neige humide ou, si au cours de sa descente elle s'est humidifiée, le dépôt présente habituellement des boules et des blocs de formes rectangulaires et de tailles variées.

La classification des avalanches.

Il existe de nombreuses classifications d'avalanches, qui peuvent être fonction du pays et de la discipline étudiée. Les différentes classifications d'avalanches prennent donc leur sens en fonction de l'objectif pour lequel l'information a été représentée.

Parmi toutes ces classifications on distingue, la classification morphologique établie par la Commission Internationale sur la Neige et la Glace, laquelle est retenue par l'UNESCO, en 1981, (Quervain et al., 1973). Cette classification fait référence d'une part aux caractéristiques de l'écoulement et à l'apparence de l'avalanche, et d'autre part à la morphologie de son écoulement sur chaque étape. On distingue, aussi, les critères descriptifs des avalanches du projet CEN – Cemagref (Rapin et Pahaut, 2000), tableau 1-1. La classification de Rapin et Pahaut (2000) fait référence aux différentes zones de l'écoulement, aux différents critères dans chaque zone, et aux caractères distinctifs de chaque critère.

ZONES	CRITÈRES		CARACTÈRES DISTINCTIFS
Zone de départ	Type de départ		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Départ spontané : causes internes au manteau neigeux (avalanche spontanée) ◆ Départ provoqué : causes externes au manteau neigeux (avalanche provoquée) <ul style="list-style-type: none"> ● non humaines (corniche, sérac, animal, ...) ● humaines <ul style="list-style-type: none"> ○ involontaire (avalanche accidentelle) ○ volontaire (avalanche artificielle)
	Forme de départ		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Départ ponctuel : avalanche partant d'un point (départ sous forme de poire, ou de cône) ◆ Départ linéaire : avalanche partant d'une ligne (avalanche de plaque)
	Qualité de la neige	Teneur en eau liquide	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Nulle : avalanche de neige sèche ◆ Faible : avalanche de neige humide ◆ Forte : avalanche de neige mouillée
		Cohésion	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Faible : avalanche de neige pulvérulente ◆ Faible à modérée : avalanche de plaque friable (tendre) ◆ Forte : avalanche de neige de plaque dure
		Type de neige	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Récente : ● non ventée ● ventée ◆ Évoluée
	Position du plan de glissement		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Dans l'épaisseur du manteau neigeux (avalanche de surface) ◆ Sur le sol (avalanche de fond)
Zone d' écoulement	Forme du terrain		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Pente ouverte (avalanche de versant) ◆ Couloir ou gorge (avalanche de couloir)
	Dynamique (ou Type d'écoulement)		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Avec nuage de particules de neige : <ul style="list-style-type: none"> ● au niveau du front (avalanche aérosol) ● derrière le front (avalanche avec panache) ◆ Sans nuage (avalanche coulante)
	Neige reprise		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Avec ◆ Sans
	Présence de blocs et/ou d'autres éléments		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Avec (blocs tabulaires, glace, rochers, arbres) ◆ Sans
Zone de dépôt	Rugosité superficielle		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Faible (dépôt fin) ◆ Forte (dépôt grossier : blocs, boules)
	Qualité de la neige		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Humide (dépôt humide) ◆ Sèche (dépôt sec)
	Souillure visible		<ul style="list-style-type: none"> ◆ Avec (avalanche souillée : terre, rochers, arbres) ◆ Sans (avalanche propre)

Tableau 1-1. Critères descriptifs des avalanches du projet CEN–Cemagref (Rapin et Pahaut, 2000)

Pour avoir plus d'information sur les différents types d'avalanches et leur comportement dynamique on peut consulter les travaux de Voellmy (1955), Mears (1992), McClung et Schaerer (1993), Marco (1994) et McClung et Mears (1995).

1.3 Les modèles numériques des avalanches.

Là encore il n'est pas question de présenter un inventaire complet des modèles physiques de dynamique des avalanches, ils sont trop nombreux. Il s'agit seulement de faire sentir la complexité du phénomène par la diversité des modèles numériques utilisés pour l'étude des avalanches. Nous nous contenterons de présenter les principaux types de modèles, les hypothèses considérées, et les paramètres utilisés. La présentation qui est réalisée ici s'inspire des travaux de Mohamed Naaim (Naaim et al., 1995) et Christophe Ancey (Ancey, 1996). Pour avoir plus d'information sur les aspects plus spécifiques des modèles numériques d'avalanches on peut consulter les travaux de Eglit (1983), Harbitz et al. (1998), Keller et al. (1998), SAME (1998), Issler (1998) et SAME (2000).

Le but général de ces modèles d'écoulement d'avalanches est d'estimer un certain nombre de paramètres de l'avalanche. Les modèles les plus simples estiment la distance d'arrêt et/ou la vitesse de l'avalanche. D'autres, plus évolués, estiment pour une date donnée et un élément de volume donné les paramètres suivants : vecteur vitesse, densité moyenne, pression ou contraintes aux frontières, ce qui permet de modéliser réellement l'écoulement.

Les premiers modèles considéraient que l'avalanche pouvait être assimilée à un solide indéformable en mouvement stationnaire. Ces modèles ont été, aujourd'hui, abandonnés, et actuellement s'utilisent les modèles qui suivent les lois de la mécanique des fluides. A partir de ces lois, deux catégories de modèles ont été développés :

- La première catégorie suppose que l'avalanche est un écoulement stationnaire à surface libre.
- La deuxième catégorie suit les lois générales de la mécanique des fluides.

À continuation nous présentons ces deux catégories de modèles.

1.3.1 Les modèles empiriques. Le modèle de Voellmy.

La première théorie générale du mouvement des avalanches fut développée par Voellmy (Voellmy, 1955), elle est aujourd'hui encore très répandue.

Voellmy propose un modèle dynamique. Il fait l'hypothèse qu'une avalanche peut se réduire à un écoulement, de masse m , stationnaire à surface libre en canal (figure 1-7).

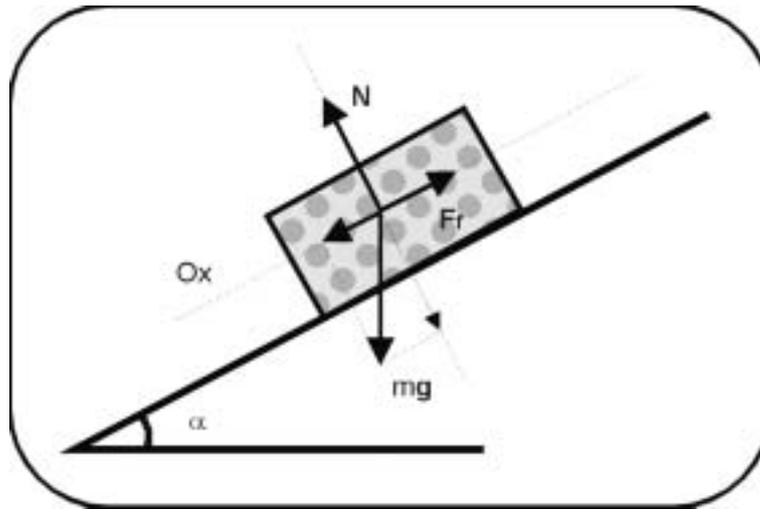


Figure 1-7. Forces qui agissent sur le centre de gravité du fluide.

Les forces qui agissent sur le fluide sont (voir figure 1-7. Forces qui agissent sur le centre de gravité du fluide) :

- mg qui représente la pesanteur.
- N qui représente la composante normale de la réaction.
- α angle par rapport a l'horizontale.
- F_f la force de frottement.

Nous pouvons écrire l'équation vectoriel du mouvement de l'avalanche comme :

$$m \frac{dv}{dt} = mg + F_f + N \quad \text{Eq.1-1}$$

Sa projection sur l'axe Ox parallèle au sol :

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \alpha + F_f \quad \text{Eq.1-2}$$

où v est la norme du vecteur vitesse.

Selon Voellmy, la force de frottement F_f est la résultante de la somme de deux frottements : un frottement solide et un frottement turbulent. Le frottement solide est représenté par $\mu mg \cos \alpha$. Le frottement turbulent est représenté par $mg \frac{v^2}{R_H \xi}$,

où R_H est le rayon hydraulique (figure 1-8).

$$R_H = \frac{\text{section mouillée}}{\text{périmètre mouillé}}$$

ξ est un paramètre indépendant de la masse de l'avalanche. Elle dépend surtout de la géométrie de la zone d'écoulement.

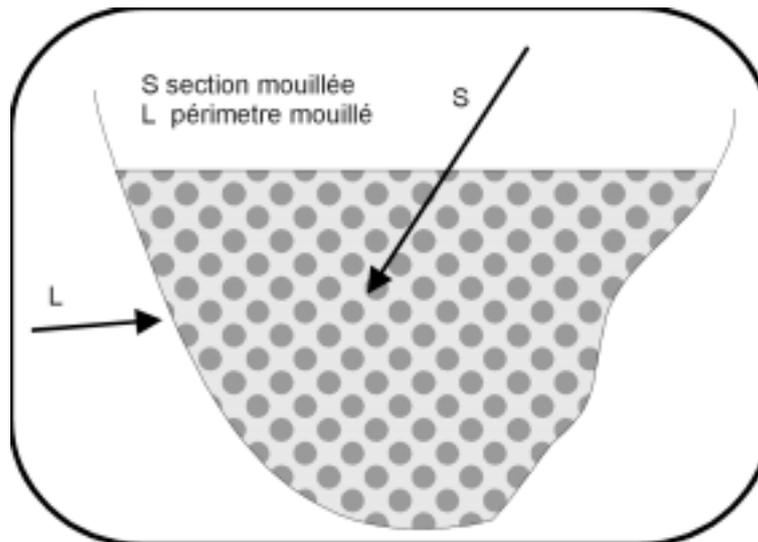


Figure 1-8. Périmètre et section mouillée. Ceux-ci sont utilisés pour le calcul du rayon hydraulique.

L'équation à résoudre est donc de la forme :

$$\frac{dv}{dt} = g \left(\sin \alpha - \mu \cos \alpha - \frac{v^2}{R_H \xi} \right) \quad \text{Eq.1-3}$$

Généralement on suppose que l'ensemble des paramètres (μ , α , ξ , R_H) restent constants, c'est à dire que l'avalanche est un matériau homogène qui s'écoule sur un plan incliné.

Nous n'allons pas ici donner les solutions de cette équation. Pour plus d'informations nous proposons les modèles développés par Perla (Perla et al., 1980) et Salm (Salm et al., 1990). Il s'agit de deux modèles inspirés par celui de Voellmy. Ils ajustent les paramètres μ , ξ selon différentes conditions d'avalanches. Le paramètre μ dépend de la masse de l'avalanche, de la qualité de la neige et de la nature du site. Le paramètre ξ est lié à la géométrie de la zone d'écoulement.

Ces modèles donnent des résultats satisfaisants pour des cas relativement simples. Pour les cas complexes, par exemple, avalanche qui se sépare en deux branches dans la zone de dépôt, il ne peut être utilisé parce qu'il ne donne pas des solutions satisfaisantes.

1.3.2 Les modèles à partir de la mécanique des fluides.

La faiblesse principale du modèle de Voellmy est de considérer qu'une avalanche peut se réduire à son centre de masse alors que la vitesse, la densité, etc. au sein de l'avalanche différent au cours de l'écoulement. Il y a des modèles comme ceux de Lang (Lang et al., 1979), Brugnot et Vila (1985) et Martinet (1992) qui considèrent qu'il existe une analogie entre les écoulements hydrauliques et les avalanches denses. Ceux-ci prennent en compte les variations géométriques en

temps et en espace et sont issus des équations générales de la mécanique des fluides auxquelles des lois de comportement sont ajoutées. Trois lois de comportement ont été étudiées : la loi de Newton, celle de Bingham et celle des écoulements granulaires. Pour les avalanches aérosols, une autre approche a été développée basée sur la constatation que la turbulence est le facteur le plus important (Brandstätter et al., 1992 ; Herman et al., 1993 ; et Naaim, 1995).

1.3.2.1 Les modèles newtoniens.

La loi de Newton exprime la linéarité entre les gradients de vitesse et les contraintes de cisaillement. Son introduction dans les équations générales de la mécanique des fluides aboutit aux équations de Navier-Stokes. En utilisant ces équations, différents codes de calcul ont été développés (Lang et al., 1979). Une vitesse seuil d'arrêt doit être fournie au code parce que l'arrêt de l'avalanche ne peut être obtenu par ce modèle. Sur la figure 1-9 nous montrons le profil de vitesse d'un fluide Newtonien.

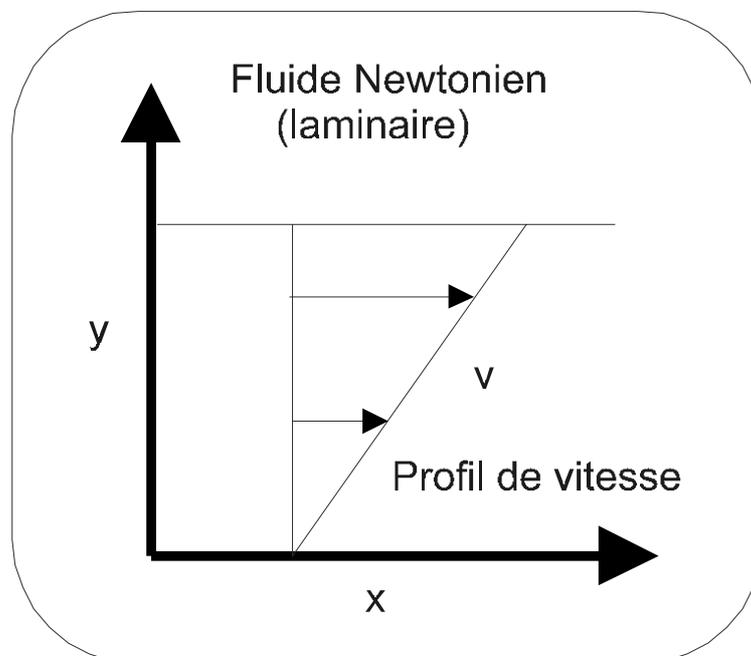


Figure 1-9. Profil de vitesse d'un fluide Newtonien.

1.3.2.2 Les modèles binghamiens.

La neige ne peut être mise en mouvement que si la contrainte de cisaillement est supérieure à une valeur de seuil qui dépend de la qualité intrinsèque du manteau neigeux (Martinet, 1992), pourtant la neige au repos n'obéit pas à la loi de comportement de Newton. La loi de Bingham est la plus simple qui puisse rendre compte de ce phénomène. Martinet (1992) introduit une analogie entre la contrainte critique de la neige en mouvement et la contrainte de cisaillement à la rupture de la neige au repos. Cette analogie est controversée, Ancey (1996) et Dent et Lang (1983), ont proposé un modèle bivisqueux qui permet d'approcher la

loi de comportement d'un fluide binghamien. Voir sur la figure 1-10, le profil de vitesse d'un fluide Binghamien.

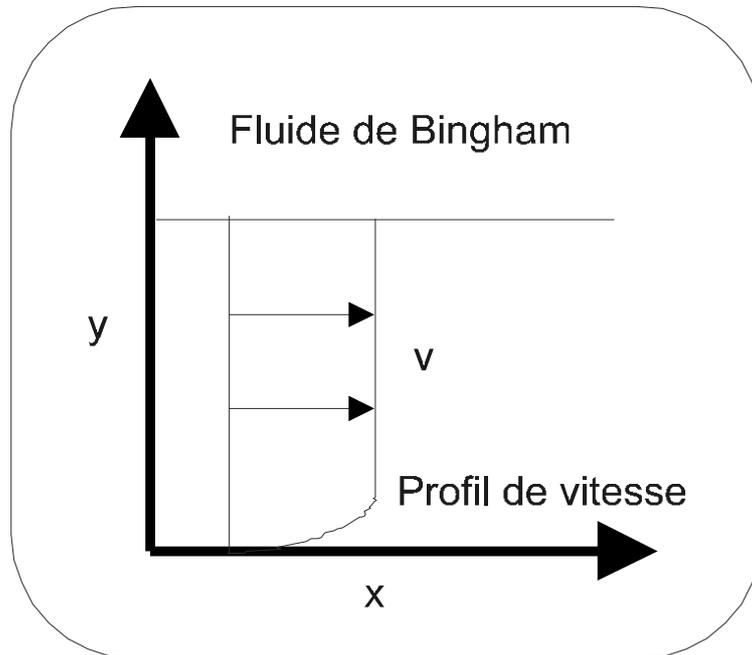


Figure 1-10. Profil de vitesse d'un fluide binghamien.

1.3.2.3 Les modèles granulaires.

Les théories relatives aux écoulements granulaires ont été employées pour modéliser les avalanches étant donné que l'avalanche est souvent constituée de boules. Cette modélisation se distingue des précédentes car, ici, ce sont les chocs entre particules qui dissipent l'énergie. Mears (1980) a tenté cette approche en utilisant les résultats obtenus par Bagnold (Bagnold, 1954 et 1956). Entre d'autres il faut citer les travaux de Norem (1991) et Hutter et Savage, (1988). Dans ces modèles, la cohésion de la neige est cependant négligée. Ils ne permettent pas la représentation des phases de départ et d'arrêt de l'avalanche, comme les modèles newtoniens.

1.3.2.4 Les modèles turbulents pour les avalanches aérosols.

L'avalanche aérosol peut être assimilée à un écoulement diphasique d'un fluide lourd composé d'air et de particules de neige en suspension dans un fluide léger composé par l'air seul. Rappelons que les avalanches aérosols se caractérisent par une forte turbulence. Une modélisation numérique a été donnée par Naaim (Naaim, 1995), elle est basée sur les équations de Navier-Stokes sous les hypothèses suivantes :

- L'air se comporte comme un gaz parfait à caractère newtonien et les particules en suspension ne modifient pas sa loi de comportement.
- Les particules en suspension suivent le mouvement du gaz avec un glissement vertical engendré par la chute de celles-ci dans l'air.

Un modèle numérique a été établi, sous ces hypothèses, et diverses comparaisons avec un modèle physique, mélange d'eau et de particules solides, ont été effectuées. Ce modèle semble reproduire la hauteur et la vitesse des fougées tant que l'écoulement reste turbulent.

1.3.3 Conclusion sur les modèles.

Ces modèles nécessitent la connaissance de paramètres qu'il est difficile d'obtenir. Des mesures en laboratoire ont cependant été utilisées pour en valider la pertinence, mais il semble difficile d'obtenir leur validation par des mesures de terrain. Un effort particulier portant sur la collecte de telles données se dessine au niveau européen à partir des projets Capital Humain et Mobilité (CHM) et Snow Avalanche Mapping and Warning in Europe (SAME) qui ont abouti à la préparation du SAME Report 1998 (SAME, 1998) et aux travaux du SAME (2000).

2 Le mouvement en Traitement d'Images.

Nous vous rappelons que l'objectif poursuivi est de concevoir et de réaliser un outil de traitement d'images permettant de déterminer la distribution des vitesses à la surface d'un écoulement de neige. Signalons qu'il s'agit d'un problème difficile car l'objet en mouvement est déformable et de couleur blanche sur un fond blanc avec des frontières peu marquées. Dans ce deuxième chapitre, nous présentons un rapport bibliographique des différentes méthodes de traitement d'images pour la mesure du mouvement et les applications possibles pour mesurer le déplacement des avalanches.

2.1 Introduction.

Si nous cherchons dans un dictionnaire le mot *mouvement*, nous pouvons trouver comme définition : "*Mouvement : état d'un corps dont la position, par rapport à un point fixe, change continûment. Déplacement d'un corps. Mouvement relatif : mouvement d'un corps considéré par rapport à un système de repères qui n'est pas nécessairement fixe*". Mais dans le contexte de séquences d'images et du traitement de celles-ci, une définition rigoureuse est bien difficile à formuler. Par la suite on utilisera indistinctement le terme déplacement et le terme mouvement.

On appelle analyse d'images, ou traitement d'images, le traitement numérique de signaux bidimensionnels.

L'analyse d'images est basée sur des concepts mathématiques qui permettent de décrire quantitativement des images de provenances diverses. Il est donc possible de l'utiliser dans des disciplines très variées. Les méthodes et techniques employées dépendent essentiellement de la nature de l'image à analyser et de l'objectif que se fixe l'expérimentateur.

Ce chapitre est consacré au traitement de l'image plane, c'est-à-dire, d'une figure originale, analogique, représentant une scène ou un objet. La modélisation de l'image consiste à la transformer en une fonction dont l'amplitude représente l'intensité lumineuse, ou brillance, de tout point du plan. Ou cas où l'image soit monochrome (noire et blanche), l'intensité en chaque point est appelée niveau de gris. On distingue dans les images jusqu'à 256 niveaux de gris.

La modélisation de l'image analogique à partir de son support matériel (tube de caméra TV, matrice CCD, vidéo stockage sur bande) s'obtient par une numérisation (digitalisation ou discrétisation) en espace et en fréquence.

L'image analogique continue est alors approximée par des échantillons que l'on écrit dans un tableau de $N \times N$ cases, sous la forme de valeurs discrètes. Le tableau comporte N^2 valeurs; chacune d'elles est appelé pixel, contraction de l'expression «Picture Element».

2.1.1 Généralités.

Une étude menée par Helmholtz (1925) vers la fin du dernier siècle sur les relations entre la structure 3D des objets et leur vitesse apparente, fut l'origine de multiples recherches entreprises sur l'étude du mouvement.

L'étude du mouvement peut avoir deux objectifs. Le premier serait de comprendre comment l'homme perçoit le mouvement, c'est l'analyse du mouvement au sens classique. Le second consiste à utiliser les informations du mouvement dans le but d'une application précise.

L'analyse du mouvement au sens classique pose globalement un ensemble de questions étroitement liées les unes aux autres. Toutefois une classification des problèmes est possible (Bouthemy, 1988). On peut les classer en sous-problèmes disjoints dont le classement traduirait un niveau d'enrichissement supplémentaire de l'information, à chaque niveau. Les trois premiers sont :

- La détection du mouvement.
- La segmentation spatio-temporelle
- L'estimation du champ de vitesses.

D'autres niveaux existent, nous ne nous y intéresserons pas car ils concernent des algorithmes de plus haut niveau (par opposition à bas niveau qui signifie de niveau pixel).

L'analyse du mouvement est un problème mal posé typique de vision bas niveau (Poggio, 1985).

Un deuxième objectif, différent à celui du sens classique, consiste à utiliser la redondance temporelle d'une séquence d'images pour résoudre un problème précis. La détection du mouvement et l'estimation du mouvement sont utilisées pour résoudre un problème concret qui, en général, est bien posé (autant d'équations que d'inconnues).

L'opposition de ces deux objectifs, analyse du mouvement et utilisation d'une information de mouvement, se retrouve dans les différents méthodes utilisées pour traiter le mouvement. Par exemple, les méthodes de détection de mouvement visent en général une application (exemple : robotique, télésurveillance) et elles sont plus développées dans le sens de leur application que dans le sens d'une analyse de scène générale. A l'inverse, les algorithmes de segmentation spatio-temporelles ou de recherche de classification de mouvement

ont plus pour objectif une analyse de scène. Il y a un peu entre ces deux objectifs la même dualité (à un niveau moindre) que l'on retrouve entre les méthodes d'estimation de mouvement visant à minimiser l'erreur de prédiction et celles visant à estimer le mouvement réel. Plus précisément, le problème de la détection de mouvement n'utilise pas toutes les possibilités qu'offrent les données pour résoudre le problème, c'est dans cette idée là que ce problème est lié à une application plus qu'à un objectif d'analyse de scène. Toutefois, l'approche des différentes méthodes de détection de mouvement va plus dans les sens d'une régularisation de problèmes mal posés que vers la minimisation simple d'une fonction. La classification précédente est donc parfaitement discutable.

2.1.2 Problèmes généraux.

Etant donné notre contexte d'application (films vidéo d'avalanches de neige), nous restreignons le problème, dès à présent, aux études 2D dans les séquences d'images. Il s'agit du mouvement apparent dans une séquence d'images qui est en général une projection 2D du mouvement réel 3D de la scène. Nous expliquerons plus tard, dans les conclusions, pourquoi nous sommes restés sur le plan 2D, et les démarches à suivre pour faire le passage au 3D. En tout cas, il s'agit d'une étape ultérieure de l'analyse.

Quels que soient les étapes traitées pour l'étude du mouvement (détection, segmentation des contours ou estimation des champs des vitesses en surface d'une avalanche dense) elles présentent certaines caractéristiques et difficultés communes.

Comme caractéristiques et objectifs nous pouvons distinguer:

- L'information de mouvement est apportée par les données (la luminance et la couleur des pixels). Elle est purement locale.
- L'objectif des différentes méthodes appliquées consiste à propager par tout l'objet concerné cette information de mouvement, sans y inclure d'autres objets ou une partie du fond. L'idéal serait d'atteindre cet objectif quelles que soient les conditions de prise de vue (caméra mobile ou fixe) et/ou les objets filmés (textures, uniformes, petits, grands ...).

Parmi les problèmes nous pouvons remarquer:

- Les variations d'éclairage peuvent être interprétées comme un mouvement. Surtout si l'on travaille à l'extérieur avec le soleil comme source d'illumination (notre cas).
- Il faut séparer le mouvement de la caméra (cas où elle est mobile) du mouvement des objets dans la scène. Nous travaillons avec des caméras fixes à fin d'éviter le mouvement dû aux déplacements de la caméra.
- Les objets en mouvement cachent une partie du fond ou d'autres objets en mouvement ou fixes.
- De même, les objets en mouvement découvrent une partie du fond ou d'autres objets.

- Si des objets uniformes glissent sur eux-mêmes ou sur un fond identique, on ne peut rien détecter.

Par la suite, nous présentons les méthodes de détection du mouvement envisageables, *a priori*, d'appliquer pour la détection du mouvement d'une avalanche.

2.2 Détection de mouvement.

La détection de mouvement est le cas le plus simple de l'étude du mouvement. Dans ce cas, on cherche seulement à détecter le mouvement et non pas le quantifier. Par la suite, nous allons essayer de décrire et poser le problème de la quantification.

2.2.1 Le problème.

En apparence, la détection du mouvement est le problème le plus simple. Le but est de déterminer pour chaque pixel de l'image, s'il appartient ou non à un objet en mouvement. Généralement, une variable binaire est associée à chaque pixel dont l'état un (1) signifie que le pixel est en mouvement et l'état zéro (0) le contraire.

La première hypothèse pour résoudre le problème repose sur les différences temporelles entre deux images.

Nous considérons deux images consécutives dans une série d'images. Nous les appellerons I_{n-1} et I_n . Nous considérons qu'un pixel (i -sens horizontal- j -sens vertical-) est en mouvement entre ces deux images I_{n-1} et I_n , si l'intensité de celui-ci est différente dans les deux images. La différence temporelle de deux images donne la première indication de mouvement, il s'agit de la carte binaire I_{Mvt} .

La carte binaire I_{Mvt} des étiquettes du mouvement est déterminée pour chaque pixel (i,j), par l'équation :

$$I_{Mvt}(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si } |I_{n-1}(i, j) - I_n(i, j)| \geq \text{seuil} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{Eq. 2-1}$$

Par exemple, travaillons avec un cas simple. Considérons le cas de la translation d'un carré uniforme sur un fond fixe et uniforme. Il s'agit du cas le plus simple que l'on puisse montrer. Dans l'image 2-1 nous montrons la carte binaire des différences temporelles d'un carré uniforme en mouvement.

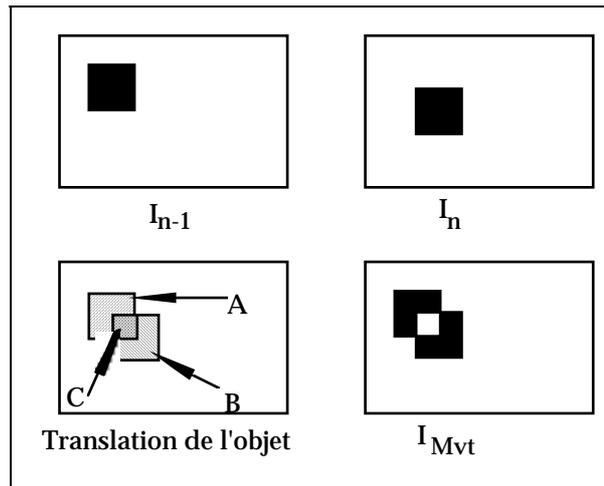


Image 2-1. Carte binaire des différences temporelles d'un objet en mouvement.

En plus du problème d'avoir à définir le seuil, la carte binaire calculée par cette équation fait apparaître des problèmes additionnels (voir image 2-1).

- Une zone du fond est découverte par l'objet en mouvement. Il s'agit de l'écho (A).
- Une zone du fond est couverte par l'objet en mouvement (B).
- Une zone de l'objet glisse sur elle-même (C).

L'objectif des différentes méthodes de détection de mouvement est de:

- Supprimer l'écho (zone A).
- Reconstruire tout l'objet en mouvement (zone B + zone C).

La détection de mouvement simple utilise obligatoirement des hypothèses a priori. En effet, il n'est pas possible quelle que soit la méthode utilisée de traiter à la fois des séquences d'images où la caméra est fixe et d'autres où elle est mobile. Historiquement, les méthodes de détection de mouvement sont apparues pour des applications où la caméra était fixe, et les principales méthodes ont été développées dans ce contexte. Les différentes méthodes peuvent être classées en quatre groupes.

1. Les premières méthodes utilisent la modélisation statistique de la fonction intensité. Le calcul des différences temporelles utilisait les techniques classiques de test de vraisemblance (Hsu et al, 1984). D'autres méthodes plus élaborées ont été développées à partir de celles-ci pour tenir compte en plus du changement de luminosité de la scène. Un changement de luminosité de la scène peut faire considérer une simple baisse de lumière comme un mouvement.
2. Une seconde série de méthodes est basée sur l'utilisation d'une image de référence. Celle-ci peut dans certains cas, être obtenue, simplement en filmant la scène dans laquelle aucun mouvement n'est présent. Autrement, des techniques d'approximation de l'image de référence existent, elles sont basées sur une technique d'intégration nécessitant des moyennages sur un nombre d'images déjà important. Celle-ci peut être une méthode pour travailler avec les

images tournées à l'extérieur où les conditions d'illumination peuvent varier sensiblement en très peu du temps.

3. Le troisième type de méthodes se base sur des opérateurs logiques. Elles consistent à faire une comparaison entre deux cartes binaires de différences temporelles: $|I_n - I_{n-1}|$ et $|I_{n+1} - I_n|$. Cette méthode est forcément non-causale, car elle utilise une image future I_{n+1} pour une détection en l'image I_n . Le principe consiste à ne garder que les étiquettes binaires à '1' présentent dans les deux cartes binaires. On résout ici le problème de l'écho (zone A), mais pas celui du recouvrement (zone C). Voir image 2-1.
4. Le quatrième groupe de méthodes utilise la théorie très générale de la modélisation markovienne appliquée au champ des étiquettes mouvement (Lalande, 1990). Les méthodes développées à partir de cette modélisation sont en générales assez robustes au bruit, mais donnent de mauvais résultats pour les gros objets. Techniques de multi-résolution ont été élaborées pour pallier le problème des gros objets. Dans toutes ces méthodes, les calculs sont en général assez lourdes.

Jusqu'ici nous avons fait une brève description des problèmes que pose la détection du mouvement et de quelques-unes des méthodes qu'on trouve dans la littérature pour détecter le mouvement. Abordons maintenant le problème de l'estimation du mouvement, puisqu'un des buts de notre travail est de pouvoir arriver à quantifier le mouvement.

2.3 Estimation du mouvement.

L'estimation du mouvement dans le contexte des avalanches de neige est très importante, parce que cela peut nous permettre de connaître un peu plus la dynamique des avalanches. Nous cherchons à quantifier le mouvement du phénomène naturel en utilisant le traitement d'images. Une étude des méthodes les plus répandues utilisées est présentée dans ce chapitre. D'une part nous présentons les méthodes spatiales et d'autre part les méthodes fréquentielles. Nous considérons méthodes fréquentielles ces qui utilisent la transformée de Fourier pour extraire des informations du mouvement.

2.3.1 Méthodes spatiales.

A continuation nous présentons les appelés pour nous méthodes spatiales. Les méthodes spatiales sont ces qui n'utilisent pas la transformée de Fourier pour extraire des informations relatives au mouvement.

Par la suite nous allons présenter le méthode spatial que nous avons utilisé : le «flot optique».

Introduction

Le terme flot optique apparut au moment où l'on commença à rechercher une modélisation mathématique du mouvement. Il s'agit d'une manière de représenter le mouvement dans une séquence d'images. Le flot optique est une représentation qui associe à chaque point physique élémentaire de l'image, un vecteur 2D vitesse, comme étant la projection sur le plan, de la vitesse dans l'espace 3D de ce point. Enfin, le flot optique est une distribution 2D des vitesses apparentes associées aux variations de luminance des objets dans l'image. Cette dernière définition nous permet d'introduire deux avertissements :

- Le mouvement réel d'une scène n'est en général pas déterminé par le calcul du flot optique. En effet, il suffit que dans une scène stationnaire, la source de lumière varie pour que le champ 2D des vecteurs du flot optique soit non nul, alors qu'il n'existe aucun mouvement réel dans la scène.
- L'égalité entre le flot optique et la projection 2D du mouvement réel d'une scène ne s'obtient que dans des cas très particuliers. Singh (1992) explique les confusions possibles entre le mouvement d'une scène et le champ 2D du flot optique. Dans notre cas et pour toute la suite de ce document, nous ne nous occuperons que de l'estimation du flot optique.

L'estimation du flot optique a de multiples applications qui peuvent être classées en deux groupes :

- les applications 2D, parmi lesquelles la restauration de séquences d'images, la segmentation spatio-temporelle ou le suivi d'objets.
- les applications 3D, dans lesquelles le flot optique est utilisé pour déterminer la structure 3D et le mouvement des objets d'une scène. Le domaine d'application principal est la vision.

Le calcul d'une estimation du flot optique peut être mené de différentes manières et il a été à l'origine de multiples travaux. Les différentes méthodes qui ont été proposées sont souvent à rattacher aux conditions d'application du flot optique.

Présentation du problème: La DFD (Displaced Frame Difference)

Notations:

Soient N et M respectivement le nombre de lignes et le nombre de colonnes de l'image.

Les pixels d'une image numérique sont répartis suivant une maille carrée. Les indices purement discrets des pixels sur cette grille sont notés (i,j) , avec $i:1..N$ et $j:1..M$.

Le vecteur mouvement en chaque pixel (i,j) est noté : $\mathbf{d}_{ij} = (dx, dy)_{ij}$, le choix de la notation dx et dy est volontaire, car les calculs réels vont nous donner des résultats réels. Un objet peut avoir un mouvement inférieur à un pixel. Souvent, dans les formules les composantes dx et dy sont utilisées sans les indices (i,j) ,

dans ces cas là il faut comprendre qu'elle sont implicites. Les variables discrètes sont étendues au domaine réel pour les calculs.

Dans une estimation de mouvement par le calcul du flot optique, le problème consiste à déterminer un vecteur $(dx, dy)_{ij}$ pour chaque pixel (i, j) d'une image I_n correspondant au mouvement estimé du pixel (i, j) entre les images I_n et I_{n-1} . Soit $I_n(i, j)$ l'intensité du pixel (i, j) de l'image I_n .

Hypothèses:

Si le pixel (i, j) d'une image n appartient à un objet animé d'un mouvement de pure translation (dx, dy) , en négligeant les effets des variations de luminosité de la scène d'une image à l'autre, on doit alors retrouver ce pixel dans l'image $n+1$ suivante aux coordonnées $(i+dx, j+dy)$.

Les objets ont un mouvement suffisamment lent entre deux images pour que l'on puisse l'approximer par un mouvement de translation.

Mathématiquement l'hypothèse d'invariance de la luminosité d'un pixel durant son mouvement se traduit par la relation suivante:

$$I_{n-1}(i-dx, j-dy) = I_n(i, j) \quad \text{Eq. 2-2}$$

La DFD (Displaced Frame Difference) est définie :

$$DFD(i, j, n) = I(i, j, n) - I(i-dx, j-dy, n-1) = 0 \quad \text{Eq. 2-3}$$

Le problème consiste, ensuite, à déterminer pour tous les pixels, les vecteurs (dx, dy) tels que leur DFD soit nulle. Pour chaque pixel, nous avons une équation pour deux inconnues. Plusieurs solutions sont possibles.

Les objectifs

La méthode pour résoudre ce genre de problème dépend beaucoup de l'objectif. On peut chercher une solution quelconque qui minimise la DFD ou chercher la relation de contrainte qui permettrait de lever l'indétermination en tentant de modéliser le problème de l'estimation de mouvement de façon plus précise. Précisément, nous allons présenter une méthode basée sur ce deuxième cas : la levée de l'indétermination afin d'obtenir un champ de vecteurs mouvement (2D) cohérent avec le mouvement réel de la scène.

L'estimation du mouvement faite pour l'analyse d'une scène animée doit considérer la cohérence globale du champ de déplacement calculé et sa relation avec le mouvement réel dans la scène. L'on recourt alors aux techniques de la vision bas niveau (Dubois, 1992) (Bouthémy, 1988). Il s'agit dans ce cas de lever l'indétermination que présente l'équation de la DFD et de résoudre ce problème mal posé typique de vision bas niveau (Poggio, 1985).

Notre but, ici, est d'étudier une méthode pouvant être appliquée dans notre contexte d'utilisation.

Méthodes visant à lever l'indétermination sur le déplacement.

A continuation nous présentons une méthode qui vise à lever l'indétermination sur le déplacement.

L'algorithme de Horn et Schunk

L'algorithme original de calcul du flot optique est dû aux travaux de Horn et Schunk dans les années 80 (Horn et Schunk, 1981).

L'hypothèse de la DFD (Displaced Frame Difference) permet d'écrire:

$$I_n(i, j) = I_{n+1}(i + dx, j + dy) \quad \text{Eq. 2-4}$$

Soit x , y et t les valeurs réelles respectivement de i , j et n . En considérant que l'intensité est continue et différentiable suivant x , y et t , le développement du second terme de l'équation 2-4 suivant la formule de Taylor, permet d'obtenir l'équation suivante:

$$I(i, j, n) = I(i, j, n) + dx \frac{\partial I}{\partial x} + dy \frac{\partial I}{\partial y} + dt \frac{\partial I}{\partial t} + \varepsilon \quad \text{Eq. 2-5}$$

où ε représente les termes d'ordre supérieur

Cette équation est équivalente à:

$$dx \frac{\partial I}{\partial x} + dy \frac{\partial I}{\partial y} + dt \frac{\partial I}{\partial t} + \varepsilon = 0 \quad \text{Eq. 2-6}$$

ce qui devient en négligeant les termes d'ordre supérieur et en divisant tous les termes par dt :

$$\frac{dx}{dt} \frac{\partial I}{\partial x} + \frac{dy}{dt} \frac{\partial I}{\partial y} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad \text{ou} \quad I_x dx + I_y dy + I_t = 0 \quad \text{Eq. 2-7}$$

Avec I_x , I_y et I_t respectivement dérivées partielles de l'intensité au pixel (i, j) par rapport aux deux axes spatiaux et au temps.

De cette équation 2-7 est extraite la composante du mouvement parallèle au gradient spatial. En effet l'équation 2-7 peut s'écrire:

$(I_x, I_y) \cdot (dx, dy) = -I_t$ où le \cdot désigne le produit scalaire classique. Une solution évidente de cette équation est la composante parallèle au gradient spatial (I_x, I_y) . Cette composante suit l'expression suivante:

$$v = - \frac{I_t}{\sqrt{I_x^2 + I_y^2}} \frac{\mathbf{Grad}}{\|\mathbf{Grad}\|} \quad \text{Eq. 2-8}$$

où **Grad** représente le vecteur gradient. Ramenées au repère initial, les composantes de ce vecteur s'écrivent:

$$d_x = -\frac{I_t I_x}{I_x^2 + I_y^2} \quad \text{et} \quad d_y = -\frac{I_t I_y}{I_x^2 + I_y^2} \quad \text{Eq. 2-9}$$

Naturellement, le vecteur mouvement ne peut être correctement déterminé par une seule composante. Il faut donc, introduire des contraintes supplémentaires afin de lever cette indétermination. Horn et Schunck (1981) proposent une contrainte de lissage partant de l'hypothèse que le plus souvent les scènes sont composées d'objets opaques de taille finie et bougeant suivant un mouvement rigide ou une déformation type zoom.

Cette contrainte supplémentaire est exprimée en cherchant à minimiser pour chaque pixel l'équation suivante :

$$E_c^2 = \left(\frac{\partial d_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial d_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial d_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial d_y}{\partial y} \right)^2 \quad \text{Eq. 2-10}$$

Comme la DFD correspond à minimiser :

$$E_b = I_x dx + I_y dy + I_t. \quad \text{Eq. 2-11}$$

Suivant le principe de la régularisation de problèmes mal posés, l'énergie totale à minimiser sera :

$$E = \sum_{ij} E_b^2 + \alpha^2 E_c^2 \quad \text{Eq. 2-12}$$

Où le paramètre α nous permet de pondérer l'importance de la contribution de la contrainte de lissage E_c dans le terme énergétique.

Deux types de méthodes sont possibles pour minimiser l'énergie totale :

- Les techniques de régularisation classique.
- Les techniques issues de modèles statistiques, en particulier issues de la modélisation markovienne. Elles possèdent l'intérêt de bien s'adapter aux images. Elles ont donc été particulièrement utilisées en restauration d'image, en détection du mouvement et en estimation du mouvement (Bilbro, 1988 et 1992).

2.3.2 Méthodes fréquentielles.

L'utilisation de la transformée de Fourier 2D permet d'extraire l'information du déplacement (dx,dy). En effet, si nous considérons $f(i,j)$ comme la luminance du pixel (i,j) et $F(u,v)$ sa transformée de Fourier bidimensionnelle, la fonction $f(i-dx, j-dy)$ a alors, en utilisant les propriétés de la Transformée de Fourier, comme transformée la fonction:

$$G(u,v) = F(u,v) \exp^{-2\pi j(udx+vdy)} \quad \text{Eq. 2-13}$$

La différence de phase entre les deux transformées de Fourier $F(u,v)$ et $G(u,v)$ caractérise le mouvement de translation, $\Delta\phi(u,v)$, que nous pouvons exprimer par:

$$\Delta\phi(u,v) = -2\pi(udx + vdy) \quad \text{Eq. 2-14}$$

Il suffit donc de calculer $\Delta\phi(u,v)$ sur deux couples (u,v) pour obtenir les deux composantes (dx,dy) du vecteur déplacement au pixel (i,j).

Par la suite nous allons présenter les trois méthodes fréquentielles que nous avons utilisé : le spectre de phase, le cepstre et la corrélation, lesquels sont basés dans le domaine transformé pour essayer de calculer la vitesse en surface d'une avalanche dense.

Spectre de phase.

La première méthode que nous proposons en utilisant le domaine transformée est l'analyse du spectre de phase.

Principe

La transformée de Fourier d'une fonction $f(i,j)$ est, en général, une fonction complexe $F(u,v)$ qui se décompose en une partie complexe et une partie réelle.

$$F(u,v) = \text{Re}[F(u,v)] + j \text{Im}[F(u,v)] \quad \text{Eq. 2-15}$$

Cette fonction peut s'exprimer aussi selon son module et son argument :

$$F(u,v) = |F(u,v)| e^{j \arg[F(u,v)]} \quad \text{Eq. 2-16}$$

Le terme $|F(u,v)|$ est appelé spectre d'amplitude. Il exprime la répartition fréquentielle de l'amplitude du signal $f(i,j)$.

Le terme $\alpha_f(u,v) = \arg[F(u,v)] = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}[F(u,v)]}{\text{Re}[F(u,v)]} \right]$ est appelé spectre de phase. Il exprime la répartition fréquentielle de la phase du signal $f(i,j)$.

Le terme $|F(u,v)|^2$ est appelé spectre d'énergie, exprimant la répartition fréquentielle de l'énergie du signal $f(i,j)$.

Selon le théorème du retard, soit $g(i,j)$ la version décalée d'un signal $f(i,j)$:

$$g(i,j)=f(i-i_0, j-j_0) \quad \text{Eq. 2-17}$$

étant i_0, j_0 le décalage.

La transformée de Fourier de l'équation 2-17 est :

$$G(u,v) = F(u,v) e^{-j2\pi(ui_0+vj_0)} \quad \text{Eq. 2-18}$$

Alors, la transformée de Fourier d'un signal décalé de i_0 est le produit de la transformée de Fourier du signal initial et du terme $e^{-j2\pi(ui_0+vj_0)}$. Comme le module du terme correctif $e^{-j2\pi(ui_0+vj_0)}$ vaut l'unité, les spectres d'amplitude et d'énergie d'un signal ne sont pas affectés par un décalage. Ce dernier se manifeste uniquement dans le spectre de phase et nous nous intéressons dans ce point.

Pour simplifier la notation des équations, à partir de ce moment nous travaillerons en mode 1D, sachant que les données obtenues sont toujours valides pour 2D.

Une image floue peut être modélisée comme la somme de fonctions déplacement (signal décalé).

Par la suite considérons les images comme images provenant d'une enregistrement vidéo. Nous avons, donc, images du type rectangulaire. Dans ce cadre soit $f(i)$ l'image vraie (non floue) dans un instant t . Appelons τ au temps de pose de la caméra vidéo. Soient v la vitesse de l'objet de la scène, i la position et L la taille de la fenêtre.

Considérons:

$$v\tau = L \quad \text{et} \quad u = \frac{1}{\tau} \quad \text{Eq. 2-19}$$

À ce point là nous montrons le calcul de le spectre d'amplitude, le spectre de phase et le spectre d'énergie d'un signal rectangulaire.

En effet, soit:

$$f(i) = \text{rect}_L\left(i + \frac{L}{2}\right) = \begin{cases} 1 & \text{pour } -\frac{L}{2} \leq i \leq \frac{L}{2} - 1 \\ 0 & \text{partout ailleurs} \end{cases} \quad \text{Eq. 2-20}$$

On a :

$$F(u) = \sum_{i=-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}-1} e^{-j2\pi ui} = \sum_{k=0}^{N-1} e^{-j2\pi u \left(k - \frac{L}{2}\right)} = e^{j\pi u L} \sum_{k=0}^{N-1} e^{-j2\pi uk} = e^{j\pi u L} \frac{1 - e^{-j2\pi u N}}{1 - e^{-j2\pi u}} \quad \text{Eq. 2-21}$$

On peut encore le mettre sous la forme :

$$F(u) = e^{j\pi u} \frac{(e^{j\pi u L} - e^{-j\pi u L})}{(e^{j\pi u} - e^{-j\pi u})} = e^{j\pi u} \frac{\text{Sin}(\pi u L)}{\text{Sin}(\pi u)} \quad \text{Eq. 2-22}$$

Le spectre d'amplitude est donné par :

$$|F(u)| = \left| \frac{\text{Sin}(\pi u L)}{\text{Sin}(\pi u)} \right| \quad \text{Eq. 2-23}$$

Le spectre de phase est donné par :

$$\alpha_f(u) = \pi u + \left(1 - \frac{\frac{\text{Sin}(\pi u L)}{\text{Sin}(\pi u)}}{\left| \frac{\text{Sin}(\pi u L)}{\text{Sin}(\pi u)} \right|} \right) \frac{\pi}{2} \quad \text{Eq. 2-24}$$

Et finalement, le spectre d'énergie s'obtient aisément :

$$|F(u)|^2 = \left[\frac{\text{Sin}(\pi u L)}{\text{Sin}(\pi u)} \right]^2 \quad \text{Eq. 2-25}$$

Il nous faut, donc, analyser le spectre de phase afin d'observer la manifestation du décalage (lire déplacement) du signal.

Cepstre.

La deuxième méthodologie que nous avons essayée est le cepstre. [Biémond et al (1990), Rom (1975), Meynard (1983), Fournel (1992 et 1996) et Fayolle (1996)].

Selon Rom (1975) on peut définir le cepstre d'une fonction $f(x,y)$ par l'expression:

$$C(p,q) = F^{-1} \left\{ \ln |F \{ f(x,y) \}| \right\} \quad \text{Eq. 2-26}$$

où F est la transformée de Fourier et F^{-1} est la transformée de Fourier inverse.

Les différentes propriétés du cepstre sont définies par Rom (1975).

Principe

Considérons seulement le mouvement de translation horizontal de l'objet, et une caméra fixe. Quand un objet se déplace une distance (s) à une vitesse constante V pendant le temps d'exposition $[0, T]$, la distorsion est unidimensionnelle et son Point Spread Fonction (PSF), h (fonction floue), est d'après Huang (1971) :

$$h(x, y; s, t) = h(x - s) = \begin{cases} \frac{1}{VT} \delta(y - t) & 0 \leq x - s \leq VT \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad \text{Eq. 2-27}$$

La fonction PSF discrète équivalente, h , utilise la distance floue $L=VT$ (Biemond et al., 1990), laquelle est le nombre de points additionnels dans l'image résultant d'un unique point de la scène originale.

$$h(i, j; k, l) = h(i - k) = \begin{cases} \frac{1}{L+1} & 0 \leq i - k \leq L, \quad j = l \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad \text{Eq. 2-28}$$

(i, j) valeurs de l'espace réel.

Dans l'espace des fréquences, la fonction correspondant au flou est, d'après Biemond et al. (1990) :

$$H(m, n) = \frac{1}{L+1} e^{-j \left(\frac{L\pi}{N} \right) m} \frac{\sin \left(\frac{\pi(L+1)m}{N} \right)}{\sin \left(\frac{\pi m}{N} \right)} \quad \forall n \quad \text{Eq. 2-29}$$

(m, n) valeurs de l'espace de fréquences.

La fréquence sera zéro en lignes parallèles à l'axe vertical, n , présentant un interligne spatial de $N/(L+1)$. Si le mouvement rectiligne se présente dans une autre direction, la réponse fréquentielle aura la même forme mais elle sera tournée par rapport à l'axe n dans l'espace des fréquences. La présence de ces zéros parallèles dans le domaine des fréquences, lesquelles sont présentes aussi dans l'image floue (en absence de bruit), nous montre la présence d'un déplacement rectiligne, mais aussi la direction du mouvement et la largeur du flou (L).

On présente la technique pour identifier le spectre de puissance de la fonction floue. Cette technique fut développée par Stockham (1975).

Soient $g(x,y)$ et $f(x,y)$ l'image floue et l'image originale, respectivement, et $h(x,y)$ la fonction de transfert qui nous permet passer de $f(x,y)$ à $g(x,y)$.

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \tag{Eq. 2-30}$$

Si l'on considère comme négligeable la contribution du bruit, on peut écrire en termes de densité spectrale:

$$|G(m,n)|^2 = |F(m,n)|^2 |H(m,n)|^2 \tag{Eq. 2-31}$$

Considérant les propriétés de la transformée de Fourier, si l'on découpe g et f en sous-fenêtres qui ne se recouvrent pas, $\{g_k(x,y), f_k(x,y), k=1,2,\dots,K\}$, la densité spectrale de ces sous-fenêtres satisfait approximativement la relation:

$$|G_k(m,n)|^2 \approx |F_k(m,n)|^2 |H(m,n)|^2 \tag{Eq. 2-32}$$

Cette relation est approximativement vraie pour les sous-fenêtres, parce que la convolution de $h(x,y)$ et de $f_k(x,y)$ s'étend au-delà des limites de $g_k(x,y)$. Si ces effets de bord sont négligeables, l'approximation est bonne.

Si l'on prend des logarithmes aux deux cotés, et en faisant la somme des résultats par chaque sous-fenêtre, k , on peut réécrire:

$$\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \ln |G_k(m,n)|^2 \approx \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \ln |F_k(m,n)|^2 + \ln |H(m,n)|^2 \tag{Eq. 2-33}$$

Le terme de gauche peut s'évaluer à partir de l'image floue. Le terme qui correspond à l'image originale (F_k) est inconnue. Stockholm et al (1975) disent qu'elle peut être estimée par une moyenne de densités spectrales évaluées à partir d'une large variété d'images. Cette estimation peut être soustraite de l'expression à gauche pour obtenir une approximation de la fonction floue, H . Finalement nous obtenons la fonction du cepstre en appliquant l'équation 2-26.

Sur l'image 2-2 nous présentons une image floue, déplacée de 7 pixels, d'un train (a), le logarithme de le spectre extrait à partir de 32 coupes au centre du train (b) et la représentation du cepstre (c).

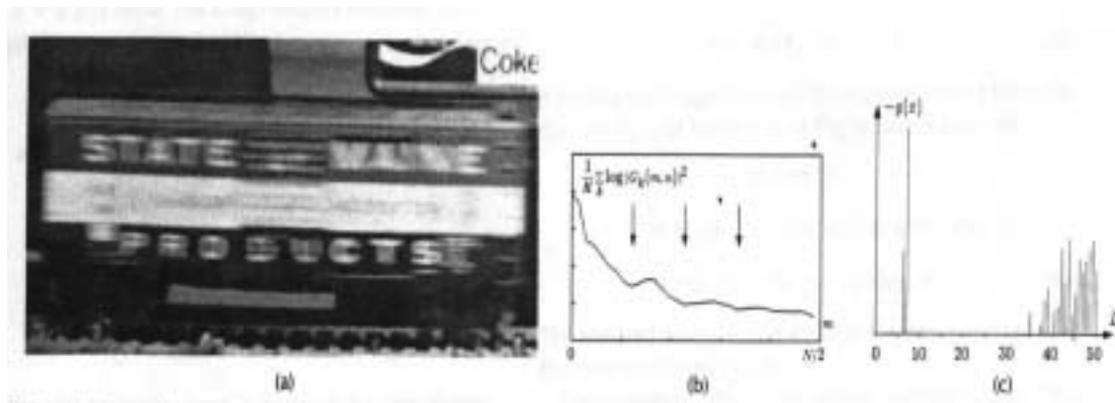


Image 2-2. a) Image floue d'un train. b) Le logarithme de le spectre extrait à partir de 32 coupes au centre du train. c) La représentation du cepstre qui nous montre un pic à $L=7$. Biemond (1990).

Intercorrélation d'images.

De nombreux auteurs ont utilisé la méthode de l'intercorrélation d'images dans des domaines comme la météorologie et l'océanographie. Par exemple, Leese et al (1971) l'appliquent pour pouvoir analyser le mouvement des nuages à partir d'images satellite, Emery et al (1986), Garcia et al (1989) et Wu et al (1992) l'appliquent pour calculer les courants marins également à partir d'images satellite, et Ninnis et al (1986) l'appliquent au mouvement des plaques de glace marine, en utilisant aussi des images satellite. On remarque donc, que tous ces auteurs appliquent la méthode avec des images satellite et avec des processus à échelle synoptique, très différents de notre cas. Néanmoins il existe deux références importants pour la présentation de l'intercorrélation en vélocimétrie par images de particules, Keane (1992) et Willert (1991).

Cette méthode fut utilisée par Marco (1994), pour réaliser une étude de fiabilité dans le but de voir quel genre d'information pouvait être extraite des enregistrements vidéo des avalanches de neige.

Principe

Considérons deux images consécutives, image 1 et image 2. Soit un repère orthonormé dont l'origine est le coin gauche supérieur de l'image. Soit A l'ensemble de couples (x,y) correspondant aux coordonnées des pixels contenus dans la fenêtre définie sur la première image et soient les fonctions $G_1(x,y)$ et $G_2(x,y)$, les fonctions intensités des images 1 et 2. Il faut étudier tous les déplacements possibles (a,b) de l'ensemble des pixels contenus dans la fenêtre de la seconde image et faire correspondre, à chaque déplacement, la valeur $Cor(a,b)$ de la fonction d'intercorrélation suivante:

$$Cor(a,b) = \sum_A \sum G_1(x,y)G_2(x+a,y+b) \quad \text{Eq. 2-35}$$

La distance de déplacement, en pixels, est obtenue si on présente les résultats sur un corrélogramme bidimensionnel, en calculant la distance entre le centre du corrélogramme et le pixel correspondant à la valeur maximale de la fonction d'intercorrélation. Ce résultat est donné en pixels dans les deux directions ox et oy. Il correspond au déplacement moyen de l'ensemble des points situés dans la fenêtre initiale.

2.4 Résumé.

Dans ce deuxième chapitre, nous avons rapidement présenté les principes théoriques de différentes méthodes d'analyse de mouvement. Ce chapitre n'est pas exhaustif, car ne sont décrites ici que les méthodes qui ont été à l'origine de nos différentes tentatives. Toutefois ce chapitre résume assez bien différents approches possibles pour aborder le problème de l'étude du mouvement comme les méthodes spatiales et les méthodes fréquentielles.

Dans le troisième chapitre nous allons présenter l'applications de les méthodes décrites antérieurement dans ce chapitre sur différents types d'images.

