

DEA Imagerie, Vision, Robotique

Simulation Visuelle d'Avalanches Poudreuses



Présenté par Matthieu Richard

Sous la responsabilité de Fabrice Neyret

ÉQUIPE ÉVASION

Laboratoire GRAVIR (CNRS, INPG, INRIA, UJF)

Remerciements

Je tiens à remercier Fabrice Neyret pour le temps et la confiance qu'il m'a accordés, ainsi que pour ses excellents conseils.

Je remercie également Franck Perbet et Philippe Decaudin, collègues de bureau et compagnons d'infortune.

Enfin, je remercie l'ensemble de l'équipe d'Evasion pour son accueil et les camarades de DEA, Jumo, Olivier, Pierre, Pau, Benjamin, Caroline, Cédric, Fabien, Pascal, Laurent et tous les autres pour leur aide et leur compagnie.

Merci à Bebert pour les petits rappels de physique.

Table des matières

1	Caractéristiques des avalanches	7
1.1	Les différents types d'avalanches de neige	7
1.1.1	Avalanche de neige humide	7
1.1.2	Avalanche de neige dure	8
1.1.3	Avalanche de neige récente	9
1.2	Les avalanches de neige en aérosol	10
1.2.1	Ce que l'on connaît	10
1.2.2	Ce qui reste inconnu	12
2	Etat de l'art de la modélisation	13
2.1	Modèles d'animation	13
2.1.1	Modèles numériques	13
2.1.1.1	La notion de particule fluide	13
2.1.1.2	Les équations de Navier-Stockes	14
2.1.1.3	Approche Eulérienne et Lagrangienne	14
2.1.1.4	Le modèle particulaire	15
2.1.1.5	Application : les fluides en synthèse d'images	15
2.1.2	Modèles phénoménologiques	16
2.2	Modèles de rendu	16
2.2.1	Cas de la neige	17
2.2.2	Les rendus surfaciques	17
2.2.3	Les rendus volumiques	18
2.2.3.1	Voxels explicites	18
2.2.3.2	Voxels temps-réel	18
2.2.3.3	Voxels procéduraux	19
2.2.3.4	Voxels implicites	20
3	Notre modèle	21
3.1	L'animation	21
3.1.1	Étude phénoménologique	21
3.1.2	Système de particules hiérarchiques	24
3.1.2.1	Application à notre modèle	24
3.1.2.2	Architecture du modèle	25

3.1.2.3	Les particules de neige	27
3.1.3	Les lois de comportement	28
3.1.3.1	Un modèle couplé avec la physique	28
3.1.3.2	Champs de vitesses de l'avalanche	29
3.1.3.3	Représentation de <i>l'activité</i> de l'avalanche	30
3.1.3.4	Entraînement des particules de neige	32
3.2	Le rendu	33
3.2.1	Choix du rendu	33
3.2.2	Les hypertextures animées	34
3.2.2.1	Principe	34
3.2.2.2	Application aux avalanches	35
4	Application et résultats	37
4.1	L'interface et la paramétrisation	37
4.2	Résultats	38

Introduction

La simulation des phénomènes naturels intéresse depuis longtemps les chercheurs en synthèse d'images. Leur richesse visuelle découle souvent d'une grande complexité de comportement ou d'apparence ; c'est ce qui engendre leur intérêt applicatif, la motivation de ceux qui les étudient, et le défi scientifique que constitue leur simulation. Parmi eux figurent en bonne place les fluides (eau, nuages, fumée...).

Les avalanches poudreuses, à cause de leur très grande complexité ne sont apparus que récemment dans la synthèse d'image. Cependant leur caractère spectaculaire en fait un élément très recherché par l'industrie des loisirs audiovisuels (cinéma et jeux vidéo).

De plus la simulation visuelle d'avalanche poudreuse peut être utile à l'aide à la décision dans la prévention des risques en montagne. En effet, un outils de visualisation réaliste des avalanches permet aux non-spécialistes, grand public et dirigeants, de mieux mesurer l'importance de ces phénomènes.

Dans ce cadre, une collaboration « coulée de boue et avalanches virtuelles » est en cours avec nos partenaires physiciens et mécaniciens du CEMAGREF, du LEGI et du LMC.

Le but de ce stage est le développement d'un modèle d'animation et de rendu d'avalanches poudreuses, les autres aspects ayant été traités précédemment. Cette catégorie d'avalanches, par son comportement et son aspect visuel, se rapproche de celle des fluides de type nuages ou fumées.

Afin de bien cerner les problèmes liés à la simulation des avalanches poudreuses, il est important de connaître les caractéristiques des différents types d'avalanches existantes et plus particulièrement celles des avalanches poudreuses (chapitre 1 on page 7).

Il est difficile de se baser sur des travaux déjà réalisés sur les avalanches en synthèse d'image car ceux-ci sont pratiquement inexistant, aucune publication n'a été effectuée sur le sujet. La meilleure approche consiste donc à s'orienter vers des méthodes introduites pour d'autres phénomènes semblables (fluides et en particulier nuages, chapitre 2 on page 13).

Pour ce qui concerne les fluides, une tendance courante est de recourir aux équations de la physique et aux méthodes de résolution numérique pour les simuler, bien que l'objectif des techniques de synthèse d'images soit de produire des comportements et aspects plausibles et non quantitativement précis. Cependant cette approche est incapable - et ce pour longtemps - de fournir les résultats visuels extrêmement détaillés dont on a besoin en

synthèse d'images.

En outre une modélisation physique du fluide ne permet pas à l'utilisateur graphiste de contrôler facilement le résultat de la scène (à savoir de donner l'aspect qu'il souhaite, amplitude, position des différents phénomènes), ce qui est pourtant une des exigences essentielle de la synthèse d'image, dans la mesure où l'animation est créée au service d'un but (*e.g.* scénario). Par conséquent, le modèle développé devra avoir une certaine souplesse pour l'animation de façon à permettre aux graphistes de donner à leur avalanche un comportement plus spectaculaire qu'il ne l'est réellement (l'avalanche du film « XXX » est un exemple).

De plus, la forme d'une avalanche peut être considérée comme une quasi-surface, nous n'avons donc besoin d'informations détaillées que sur la périphérie du volume.

Nous nous tournerons donc vers une autre approche, phénoménologique, qui s'attache à reproduire directement et qualitativement les comportements émergents les plus visibles du phénomène : volutes, vagues et vortex à plusieurs échelles, oscillation du front de l'avalanche, etc (chapitre 3 on page 21), qui sont par ailleurs les plus difficiles à simuler par les méthodes numériques.

Ceci dit, nous verrons comment coupler notre modèle avec une simulation numérique précalculée à une résolution grossière, fournie par nos partenaires physiciens.

Notre modèle, basé sur des systèmes de particules hiérarchiques, recevra alors en entrée la simulation à grande échelle et modélisera les phénomènes aux échelles inférieures qui sont influencés par la simulation.

Les résultats, bien qu'incomplets en terme d'implémentation, nous permettent déjà d'être optimiste sur les capacités de notre modèle, tant du point de vue de la maniabilité que du rendu (chapitre 4).

Chapitre 1

Caractéristiques des avalanches

Le but de cette partie est d'une part de décrire les caractéristiques des avalanches de neige de manière générale et d'autre part de faire ressortir la particularité des avalanches de neige poudreuse (ou *neige en aérosol*) pour mettre en évidence en quoi ces dernières sont différentes des autres¹.

1.1 Les différents types d'avalanches de neige

La définition donnée par le dictionnaire **Larousse** pour le terme avalanche est : *masse de neige qui se détache et dévale sur le versant d'une montagne...* Cette définition couvre un très vaste éventail de phénomènes qui sont relativement différents les uns des autres tant du point de vue de leur aspect que des phénomènes physiques qui les gouvernent. Parmi les nombreuses classifications existantes, l'une d'elle présente trois classes :

- les avalanches de neige humide ;
- les avalanches de neige dure ;
- les avalanches de neige récente.

Bien évidemment ces classes ne sont pas disjointes les unes des autres. Une avalanche peut au départ faire partie d'une classe, puis au cours de l'écoulement muter vers une autre. Par exemple, une avalanche de plaque dure peut évoluer, si elle descend suffisamment longtemps, vers une avalanche de neige récente.

Pour plus de clarté, nous présenterons ces trois classes indépendamment les unes des autres, sans s'occuper des transitions qui peuvent s'opérer entre elles.

1.1.1 Avalanche de neige humide

Ces avalanches se produisent principalement au printemps, lorsque le manteau neigeux commence à fondre. La neige se transforme, se charge en eau liquide. L'eau se comporte alors en lubrifiant entre les différentes couches et abaisse la cohésion de la neige. Dans ces avalanches de fonte, des masses énormes de neige entrent en jeu, ce qui les rends très

¹informations extraites de [CR02, Pow02, Ava02, Gra02, Ski02, NM02, SB02]



FIG. 1.1 – avalanche de neige humide

dévastatrices. L'ordre de grandeur de la densité de la neige est de 400 kg/m^3 à 500 kg/m^3 . Ces coulées présentent globalement les caractéristiques d'un fluide. Elles comportent souvent en leur sein des boules et/ou des blocs (cf figure 1.1).

1.1.2 Avalanche de neige dure

Les avalanches de neige dure ou de plaques sont les plus fréquentes. Une plaque est une surface de neige compacte qui se détache du reste du manteau et qui se met à glisser sur le sol ou sur la précédente neige. Ces plaques peuvent être immenses et laissent une limite de fracture bien visible (cf figure 1.2). La masse volumique de telles coulées se situe entre 200 kg/m^3 et 400 kg/m^3 . Les risques sont particulièrement importants lorsque de la neige compacte se dépose sur de la neige molle ou moins dense. Une variété de plaques, dites plaques à vent, se forme sous l'action du vent ou après une chute de neige. Brisés par le vent, les cristaux sont réduits en fines particules qui, en se déposant au sol, prennent rapidement une bonne cohésion. Ceci explique également la formation des corniches aux voisinages des crêtes.

Ces avalanches de plaques sont redoutables car ce sont les plus difficiles à prévoir ; le simple passage d'un skieur peut suffire à les déclencher.



FIG. 1.2 – avalanche de neige dure

1.1.3 Avalanche de neige récente

Ce type d'avalanche survient à n'importe quel moment de la journée, après ou pendant une importante chute neige. La neige est froide et sèche. On peut distinguer deux types de coulée :

- si l'écoulement de neige est relativement concentré (ordre de densité : 100 kg/m^3 à 200 kg/m^3), on appelle la coulée *avalanche dense* ; la vitesse de l'écoulement se situe entre 10 m/s et 40 m/s . Durant la coulée, les grains sont en contact quasi-permanent les uns avec les autres. Certaines modélisations comparent ces avalanches à des écoulements de matériaux granulaires et prennent alors en compte les interactions, frottements et collisions entre les grains.
- dans le cas où la concentration de la neige est plus faible (inférieur a 100 kg/m^3), alors on parle d'*avalanches en aérosol*. La neige, très volatile, se mélange à l'air pour former un nuage de neige. Lorsque l'inclinaison et la longueur du versant sont suffisantes, l'aérosol de neige va se former et va couler le long de la pente en formant des rouleaux à axes horizontaux, très rapide (jusqu'à 100 m/s !). Les avalanches de poudreuses sont freinées par l'air et non par le relief. Cet aérosol pousse l'air devant lui en créant une onde de choc (le « cui ») qui arrache tout sur son passage. La neige arrive ensuite et, lorsqu'elle rencontre un obstacle, elle se compacte en un véritable béton. Ce sont les avalanches les plus spectaculaires mais également les plus dangereuses.

Il est à noter que parfois des coulées comportant un mélange des deux types d'avalanches de neige récente peuvent également se produire (cf figure 1.3). Ces coulées intermédiaires sont appelée *avalanches mixtes*. Dans ce cas là sous la partie en aérosol (dont nous verrons les caractéristiques plus en détails ci-après) est dissimulée une partie dense. Les deux couches différentes interagissent alors l'une avec l'autre. Nous ne nous attarderons pas sur ce type d'avalanche car les interactions entre les couches sont encore mal connues. Nous nous concentrerons sur la modélisation d'avalanches purement aérosol.



FIG. 1.3 – avalanche de neige dense et avalanche mixte

1.2 Les avalanches de neige en aérosol

Les avalanches denses ont fait l'objet du premier volet de la coopération avec le CEMAGREF. Mon étude concerne exclusivement les avalanches aérosol. Comme nous allons le voir, leurs caractéristiques sont très différentes des autres types d'avalanches.

1.2.1 Ce que l'on connaît

On utilise souvent pour désigner ce type d'écoulement les termes « avalanche poudreuse », « avalanche (en) aérosol » ou parfois « avalanche pulvérulente ». Le terme *poudreuse* provient du fait que, dans la majorité des cas, le manteau neigeux est constitué de neige récente, fraîche et peu transformée par le vent ou la température. Les cristaux de neige enchevêtrés les uns dans les autres permettent au manteau de tenir sur des pentes assez raides. Cependant cet équilibre est précaire et l'alourdissement de la couche par la neige qui continue de tomber suffit souvent à déclencher la coulée.

Les appellations « aérosol » et « pulvérulente » sont dues au comportement des particules de neige très volatiles qui lors de l'écoulement se mélangent à l'air pour former un nuage aérosol.

En effet dans le cas des avalanches poudreuses, la concentration volumique en particules est beaucoup plus faible que dans les autres avalanches (elles occupent un volume de l'ordre de 1% du volume total de l'avalanche). Ainsi, les avalanches poudreuses se présentent sous la forme d'un mélange biphasique très turbulent d'air et de particules, dans lequel toutes les particules de neiges sont en suspension.



FIG. 1.4 – avalanche de neige poudreuse

De plus, il a été montré [Clé99] que la très basse concentration volumique en particules et la forte turbulence de l'écoulement permettaient de négliger le phénomène de collisions entre particules. La dynamique des avalanches poudreuses est celle de ce nuage de suspension de particule qui, étant plus lourd que l'air ambiant dévale la pente à grande vitesse. On remarque également que l'aspect de l'avalanche ressemble beaucoup à celle d'un nuage ou d'un panache de fumée (cf figure 1.4).

Les données concernant les avalanches de neige poudreuse sont peu nombreuses et très souvent seulement qualitatives. Il est en effet très difficile d'étudier ces phénomènes sur le terrain, puisqu'il est impossible pour l'instant de prévoir le déclenchement naturel d'une avalanche, que le déclenchement artificiel est onéreux et souvent hasardeux et que la force et la puissance du phénomène rendent la majorité des capteurs inefficaces (les techniques d'imagerie radar sont prometteuse mais plus que balbutiante). Cependant, quelques expériences menées sur le terrain comme l'avalanche déclenchée le 25 février 1999 dans la vallée de la Sionne [DGA01] permettent d'obtenir les ordres de grandeurs des données externes mesurées :

Épaisseur de la coulée	50 m à 100 m
Logeur	500 m à 800 m
Vitesse du front	50 m/s à 100 m/s

Les données internes estimées et non mesurées sont :

Concentration volumique en particules	0,5% à 1% du volume total
Masse volumique	5 kg/m ³ à 10 kg/m ³
Vitesse du centre de gravité	40% de la vitesse du front

Bien entendu ces valeurs ne sont que des ordres de grandeur et permettent simplement de se faire une idée des caractéristiques de ce type d'avalanches.

1.2.2 Ce qui reste inconnu

Comme nous venons de le mentionner, les études de terrain sont très rares car difficiles à mener. La communauté scientifique travaillant dans le domaine n'ayant à sa disposition que très peu de données, il est difficile pour les différentes équipes de confronter leurs théories et résultats d'expérience avec la réalité des avalanches de neige poudreuse. Une conséquence directe en est que certains phénomènes se produisant à l'intérieur des avalanches sont encore mal connus.

Un exemple de phénomène qui reste encore obscur concerne l'*entraînement* de particules par l'avalanche : le moteur d'une avalanche est son poids, dû à la présence des particules de neige en suspension. Cependant lors de l'écoulement, l'augmentation du volume de l'avalanche par incorporation de l'air ambiant en son sein et la sédimentation des particules tendent à diminuer sa masse volumique. L'avalanche pour garder sa dynamique doit donc se recharger en particules de neige fraîche. Ce phénomène d'entraînement des particules du manteau neigeux s'appelle le *phénomène de reprise*, phénomène pour l'instant mal connu et peu exploré. On ne sait pas encore très bien quel est son impact réel sur la dynamique de l'avalanche.

Un autre exemple se rapporte à l'évaluation des grandeurs instantanées à l'intérieure de l'avalanche. En effet on ne peut qu'estimer ces valeurs sur des « constatations expérimentales » comme par exemple le calcul de résistance d'une dent défléctrice en béton qui a été endommagée par une avalanche aérosol.

On est donc encore bien loin de comprendre tous les phénomènes qui se produisent au sein d'une avalanche, c'est pourquoi il n'existe pas de modèle théorique complet qui décrit ce phénomène. Néanmoins on connaît en partie les lois de comportements empiriques de ces avalanches même si elles ne concerne que la partie extérieure.

Chapitre 2

Etat de l'art de la modélisation

Comme nous l'avons vu ci-dessus, les avalanches poudreuses sont des fluides biphasiques dont la dynamique est semblable à celle de nuages convectifs. Nous allons donc ici présenter les différents travaux effectués en synthèse d'images dans les domaines de l'animation et du rendu d'avalanches de neige, et plus généralement de fluides.

2.1 Modèles d'animation

Tout d'abord précisons qu'aucun travail connu à ce jour n'a été publié en CG sur les avalanches de neige poudreuse. Les travaux existant sur les avalanches en mécanique des fluides se situent souvent dans l'espace à 2 dimensions et sont difficilement transposable à la synthèse d'images car ils s'intéressent très peu à l'apparence du phénomène. Seul [BH01] ont travaillé sur les avalanches de neige dense et les laves torrentielles. Leurs travaux, réalisés dans le cadre de la même collaboration, servent d'ailleurs de base à nos travaux (cf chapitre 3 on page 21).

Dans les différents travaux qui ont été effectués sur les fluides, on distingue deux approches différentes. La première se base sur des modèles numériques, la seconde sur des modèles phénoménologiques.

2.1.1 Modèles numériques

Dans le domaine de l'étude des fluides, il est une notion particulièrement utile dans le cadre physique et informatique : la notion de *particule fluide*.

2.1.1.1 La notion de particule fluide

Les molécules d'un fluide sont, en raison de son état, en constant mouvement les unes par rapport aux autres. Elles sont plus particulièrement caractérisées par une plus ou moins importante fluctuation autour d'une vitesse moyenne. Cette fluctuation est directement liée à une excitation énergétique puisque leur amplitude définit la température du fluide.

Les valeurs moyennes de la cinétique des molécules sont évidemment conséquences de phénomènes de plus grande échelle, il s'agit de l'écoulement du fluide.

Pour l'étude de la cinétique (et indirectement de la dynamique), il faut donc faire abstraction des phénomènes intermoléculaires (du domaine de la thermodynamique) et trouver une structure qui soit caractéristique de l'écoulement du fluide (à son échelle).

Les physiciens introduisent, pour cela, la notion de *particule fluide*. Cette dernière regroupe un ensemble de molécules afin d'en tirer des caractéristiques moyennes. Si l'on considère les données thermodynamiques constantes dans le problème (pas de fortes variations de températures ou de pression, c'est à dire un système énergétiquement fermé), on peut introduire un regroupement des molécules selon un volume choisi négligeable devant la taille de l'écoulement et le plus grand possible devant la taille moléculaire. Cette modélisation a plusieurs conséquences intéressantes. En particulier, les caractéristiques de la particule se trouvent être locales et continues à l'échelle de l'écoulement ; cela justifie en particulier l'utilisation des dérivées spatiales.

La particule fluide fournit donc à l'informatique une base solide pour des modèles numériques relativement fidèle à la théorie physique. Cependant, en pratique, les forces qui régissent l'écoulement ont une complexité suffisante pour interdire une modélisation totalement fidèle pour beaucoup de phénomènes, comme nous allons le voir.

2.1.1.2 Les équations de Navier-Stockes

Si on applique les lois de la dynamique à la particule fluide définie précédemment, on obtient l'équation dite de « Navier-Stockes » :

$$\rho\tau \vec{a} = \vec{f}\tau + \int \int_{\Sigma} (-P + \sigma) d\vec{S}$$

pour une particule de surface fermée S , de volume τ et de masse volumique ρ . \vec{f} représente les forces volumiques extérieures et $-P_{\sigma}$ la somme des contraintes de pression et friction visqueuse exercées par le fluide sur la particule.

Cette équation traduit l'évolution spatio-temporelle de la particule dans un fluide newtonien incompressible. Avec quelques informations supplémentaires (champ de pression, continuité du fluide), on peut ainsi calculer le champ de vitesse dans le milieu et donc déterminer l'écoulement. La plupart des simulation physiques d'écoulement en ingénierie sont aujourd'hui réalisées avec cette technique.

2.1.1.3 Approche Eulérienne et Lagrangienne

Simuler un fluide consiste donc à calculer l'évolution de fonctions continues telles que la densité, la vitesse, la pression ou la température dans l'espace et le temps.

Deux approches existent alors pour résoudre l'évolution de ces fonctions : l'approche Eulérienne et l'approche Lagrangienne. Les techniques utilisant l'approche Eulerienne, telles que les techniques des éléments finis, consistent à diviser l'espace en une grille et d'étudier l'évolution du fluide en chaque noeud de la grille. Au contraire l'approche Lagrangienne

consiste à suivre l'évolution spatiale et temporelle d'un certain nombre d'éléments à l'intérieur du fluide. La technique des SPH (Smooth Particle Hydrodynamics [DC96]) appartient à ce formalisme Lagrangien, tout en reprenant un formalisme proche des éléments finis.

2.1.1.4 Le modèle particulaire

Les systèmes de particules, tels que les définit Reeves [Ree83, RB85], représentent les objets comme des nuages de primitives graphiques simples (points, traits...) distribuées dans un volume, contrairement aux représentations classiques basées sur des surfaces. Un système de particules peut également être animé. Ses particules peuvent alors se déplacer, interagir et changer d'aspect au cours du temps. La position, l'orientation, les attributs et la dynamique de chaque particule sont définies par un ensemble de processus stochastiques soumis à certaines contraintes.

L'intérêt d'un système de particules est qu'il est capable de modéliser de manière assez simple des objets d'apparence changeante et aux mouvements complexes.

Luciani *et al.* ont été parmi les premiers à travailler sur les systèmes de particules [LJF⁺91] en particulier pour représenter les fluides [LHVD95], modélisant le comportement du fluide par les interactions élastiques et visqueuses entre les particules.

2.1.1.5 Application : les fluides en synthèse d'images

Dans le cadre de la synthèse d'images, les deux approches coexistent souvent ensemble.

Par exemple, Gamito [Gam94] décrit le fluide comme un champ de vorticité. Il utilise une méthode semi-Lagrangienne dans le sens où fluide est représenté par un système de particules porteuses de vortex, cependant il garde une grille afin de calculer le champ de vorticité, les particules étant ensuite advectées par le champ de vecteur.

Foster et Metaxas [FM96, FM97] résolvent les équations de Navier-Stokes dans une grille 3D selon la méthode des différences finies, mais utilisent des particules pour « traquer » la surface libre et se servent des équations Lagrangiennes du mouvement pour calculer le déplacement d'objets rigides.

Stam [Sta99, Sta01] utilise à la fois une méthode semi-Lagrangienne et une méthode implicite sur une équation simplifiée de Navier-Stokes (méthode reprise dans [FF01, FSJ01]). Cela lui permet d'obtenir un solveur stable quelque soit le pas de temps mais qui souffre d'une « dissipation numérique » qui tend à réduire rapidement l'activité du fluide simulé.

Toutes ces méthodes, basées sur la résolution des équations de la dynamique des fluides, ont l'assurance d'une solution consistante. Cependant elles doivent, pour ceci, résoudre des équations différentielles sur des grilles de résolution suffisamment grande pour obtenir les plus petits détails et avec un pas de temps suffisamment faible pour éviter la divergence du système.

Or lorsque la résolution de la simulation 3D augmente en n , le coût de calcul augmente lui en $O(n^3)$.

2.1.2 Modèles phénoménologiques

Au contraire, les modèles phénoménologiques [LF02, Ney02, DKY⁺00, Ney97, Gar85] se basent sur approche macroscopique des phénomènes. Au lieu de considérer les interactions moléculaires, ils essaient de caractériser les structures spécifiques visibles (*i.e.* phénomènes émergents) qui apparaissent et de modéliser leur évolution, leurs propriétés et leurs interactions.

Ainsi Praizelin et Neyret [Ney02] se servent des lois phénoménologiques (empiriques ?) telles que celles développées sur les ondes de chocs et les ondes de surface pour animer leur modèle de rivières et calculent le champ de vitesse par une simple équation de Laplace en deux dimensions.

Foster et Lamorlette [LF02], travaillant pour l'entreprise de production PDI, se basent sur la constatation que la plupart des propriétés visuelles qui définissent le feu sont statistiques. Ils identifient les caractéristiques principales du phénomène et en tirent un certain nombre d'éléments structurels. Ces éléments structurels sont ensuite contrôlés par des paramètres d'animation qui, suivant les lois qui les dirigent - physiques ou faites par un graphiste -, permettent d'obtenir un comportement plus ou moins réel (toutes les images de feu dans le film d'animation *Shrek* sont issues de cette technique).

Dans le cadre de l'animation des nuages, différentes approches phénoménologiques existent. Dans [Gar85], Gardner utilise des ellipsoïdes texturées par un bruit procédural semi-transparent et les anime en modulant les valeurs des paramètres du bruit. Dobashi et al. [DKY⁺00] divisent l'espace en voxels et utilisent un automate cellulaire pour savoir si un nuage est présent dans le voxel. Leur animation est basée sur des règles de transition simples et empiriques qui permettent d'obtenir un mouvement réaliste prenant en compte les effets du vent et les désirs des animateurs. Neyret [Ney97] décompose la dynamique de nuages convectifs en un ensemble de mouvements de phénomènes spécifiques caractérisés par les physiciens, tels que les instabilités de Rayleigh-Taylor, de Kelvin-Helmholtz, les cellules de Bénard, les vortex, les thermiques etc... Chaque phénomène est alors simulé par des lois empiriques plus ou moins basées sur la physique afin d'obtenir le comportement voulu.

Cette approche, évitant de résoudre les équations complexes de la dynamique des fluides, offre ainsi le double avantage de permettre d'obtenir des modèles moins coûteux en temps de calcul mais surtout d'avoir un contrôle beaucoup plus étendu sur le phénomène, puisque les entités traitées sont celles que le graphiste veut manipuler et un comportement qui peut s'affranchir de celui de la physique au besoin (*e.g.* pour accroître le caractère dramatique).

2.2 Modèles de rendu

Une fois l'animation effectuée, on obtient un ensemble de valeurs (champs de vecteurs, de vitesses, de densité, positions de points, etc.) qu'il faut alors interpréter visuellement.

Le rendu consiste à habiller les primitives géométriques afin d'obtenir l'aspect du phénomène à modéliser. Nous étudierons tout d'abord les techniques développées pour représenter la neige. Cependant l'aspect des avalanches poudreuses est plus proche de celle d'un nuage ou d'un panache de fumée, c'est à dire d'un milieu à frontière floue. Nous verrons donc ensuite les différentes approches réalisées pour rendre ce type d'aspect.

2.2.1 Cas de la neige

Les travaux effectués pour représenter la neige en synthèse d'images sont peu nombreux [Fea00, NIDN97], et ne concernent que des modélisations statiques de manteaux neigeux.

Fearing [Fea00] s'intéresse principalement à la modélisation de la répartition de la neige sur les surfaces. Le rendu est réalisé par un shader qui approxime la coloration et la surface de la neige.

Nishita *et al.* [NIDN97] utilisent une technique similaire à celle qu'ils ont développé pour les nuages [DKY⁺00] (cf 2.2.3.4) ; ils modélisent leur neige par des metaballs (*i.e.* des surfaces implicites définies par un potentiel décroissant avec la distance) caractérisées par une fonction de densité (fonction polynomiale de degré 6). Ils effectuent alors un rendu par lancer de rayons dans un espace voxelisé avec un modèle d'illumination prenant en compte les multiples réflexions (réfraction, *scattering*) de la lumière sur les cristaux de neige.

Comme nous l'avons dit, ces travaux sur la neige ne la représente qu'à l'état statique, or l'apparence de la neige est différente dans le cas où elle est en mouvement et surtout mélangée à l'air. Pour représenter des phénomènes à interface diffuse, deux classes de rendu peuvent être utilisé : les rendus à base de surfaces et ceux à base de volumes.

2.2.2 Les rendus surfaciques

Les rendus surfaciques s'exécutent sur des objets représentés par des ensembles de surfaces délimitées par des arêtes. C'est la représentation la plus répandue car la plus rapide à l'affichage. Cependant, la notion de « profondeur » de l'objet et ses limites floues ne peuvent dès lors être représentées que par des textures car seules celles-ci permettent de donner l'illusion de surface imprécise en jouant sur la transparence.

Trembilski [AA02], par exemple, récupère des données météorologiques sous forme d'un nuage de points. Par un algorithme de marching-cube, il reconstruit une iso-surface qu'il déforme afin d'obtenir la forme d'un nuage. il plaque ensuite une texture semi-transparente calculée selon une fonction de densité pour donner l'impression du caractère éthéré du nuage.

Gardner [Gar85, Gar84] utilise des ellipsoïdes pour décrire ses nuage. Il leur applique ensuite des textures procédurales. Les paramètres des fonctions mathématiques qu'il utilise (séries de Fourier composées par une somme de sinus) permettent de moduler l'intensité lumineuse et la transparence de la texture. Il est capable grâce à cela de simuler la densité du nuage (il accroît la transparence sur le bord de la texture de sorte qu'on ne voit plus l'ellipsoïde) et même de donner l'illusion de volume (cf figure 2.1).

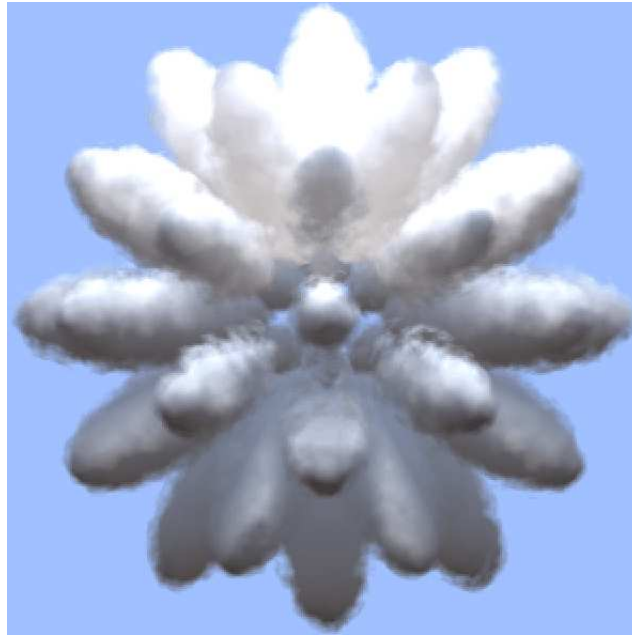


FIG. 2.1 – Textures de Gardner

2.2.3 Les rendus volumiques

2.2.3.1 Voxels explicites

Les rendus volumiques permettent de représenter à l'écran des objets décrit par leur volume. La matière est échantillonnée en voxels (contenant par exemple une densité) répartis selon une grille 3D. Pour connaître l'opacité d'un rayon donné, il suffit de traverser la grille le long de ce rayon avec un algorithme de type Bresenham et de cumuler l'opacité des voxels rencontrés. De même, on peut connaître la luminosité illuminant chaque voxel en suivant le rayon qui va de ce voxel à la source de lumière (ces techniques sont très coûteuses).

Ainsi Jensen *et. al* [FSJ01] utilisent les volumes de voxels dans leur algorithme de « photon map » afin de rendre de la fumée en tenant compte de chemin lumineux complexes..

2.2.3.2 Voxels temps-réel

Une technique employées est celle des textures 3D (extension des textures 2D) qui permet de rendre rapidement des objets décrit par une distribution de densité tels que les nuages ou la fumée. Cette technique est d'ailleurs celle utilisée par Stam [Sta99] pour représenter sa fumée.

Une méthode employant les capacités de la carte graphique pour afficher une texture 3D consiste à découper le volume en tranches appelées *slices*. En effet le hardware ne reconnaît que les polygones comme primitive d'affichage, et ne peut traiter directement les volumes.

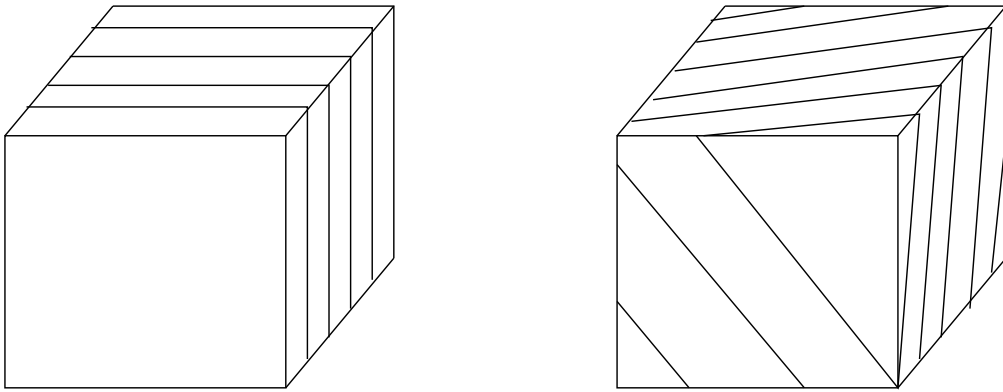


FIG. 2.2 – Découpage des slices suivant une direction privilégiée ou parallèlement à l'écran

Afin de pouvoir rendre un volume, on le découpe en une succession de plans parallèles, chaque plan est ensuite texturé en fonction de sa position dans le volume et de la texture 3D. La succession de plans est alors affichée à l'écran et les textures semi-transparentes sont composées de façon à redonner l'impression de volume.

A noter que la façon de découper le volume intervient dans la vitesse d'affichage et la qualité du rendu. Si le découpage s'effectue dans une direction privilégiée (le sens d'une grille par exemple), le calcul sera plus aisé et plus rapide mais certains angles de vue mettront en évidence la superposition des slices. En revanche si le découpage est fait face à la caméra, l'illusion sera parfaite mais le calcul des plans plus ardu (cf figure 2.2).

2.2.3.3 Voxels procéduraux

Les hypertextures [PH89] définissent la densité en tout point à l'aide d'une fonction procédurale, le coût mémoire est donc nul. En fait, ce modèle est une extension des textures procédurales mais évaluées à travers un volume plutôt que sur une surface. Les objets sont décrits par deux types de fonctions :

- une fonction de densité de l'objet. Cette fonction définie dans l'intervalle $[0,1]$ décrit la densité de l'objet en tout point de l'espace. la *surface diffuse* de l'objet est l'ensemble des point de l'espace compris entre 0 et 1.
- un ensemble de fonctions de modulation de densité qui permettent de moduler la densité de l'objet à l'intérieur de l'interface. Chaque fonction est utilisée pour contrôler un aspect des caractéristiques spatiales de l'objet.

La composition des fonctions de modulations permet ainsi d'obtenir les caractéristiques voulues pour l'interface de l'objet. Le rendu est alors accompli comme pour les voxels explicites.

2.2.3.4 Voxels implicites

Enfin un autre type de rendu peut être utilisé : les *sprites* sont des images qui sont affichées par dessus une primitive géométrique très simple (point en général). Ces images, comme les textures, peuvent jouer sur la transparence pour donner l'apparence d'une surface floue .

De même Dobashi *et. al* [DKY⁺00] calculent le rendu de leur modèle de nuage par une méthode volumique. Leur nuages sont simulés par des automates cellulaires qui indiquent si un nuage est présent dans un voxel ou non. A partir de ces informations, ils calculent la densité du nuage en chaque point de l'espace en interpolant et lissant la distribution binaire des voxels. Ils calculent ensuite l'intensité lumineuse arrivant au centre de chaque voxel. Cette intensité permet alors de choisir selon une base de donnée la texture la plus proche en terme de transparence. Ces textures sont ensuite plaquées sur des billboards pour afficher les nuages par *splatting*.

Chapitre 3

Notre modèle

Comme nous l'avons déjà précisé, notre objectif n'est pas de réaliser une simulation physiquement exacte mais de permettre aux graphistes de disposer d'un outil facilement manipulable et produisant des images *crédibles*.

Nous verrons d'abord de quelle manière notre modèle est animé puis quelle technique de rendu nous allons employer.

3.1 L'animation

L'usage de méthodes de résolution numérique dans le domaine de la synthèse d'images multiplie la complexité (et les ressources nécessaires) bien au delà des limites habituellement acceptables en raison du niveau de détails demandé (autant visuel que phénoménologique pour la plupart des cas). De plus il n'offre pas un contrôle intuitif des différents paramètres du phénomène à modéliser.

Nous avons donc préféré utiliser une approche phénoménologique, les raisons de ce choix ayant été énoncées dans l'introduction. Nous allons tirer avantage des structures émergentes d'une avalanche pour obtenir une simulation perceptuellement convaincante.

Pour obtenir une approche efficace, il convient d'abord de bien étudier les différents phénomènes à représenter.

3.1.1 Étude phénoménologique

Le principal phénomène à l'origine de l'aspect d'une avalanche est le motif relativement régulier de la vorticité engendré par les frottements entre les particules d'air ambiant statiques et le mélange particules d'air-particules de neige de l'avalanche, qui descend la pente à grande vitesse.

La mise en rotation du fluide intervient à plusieurs niveaux :

- Lors de la rencontre brutale de l'air immobile avec le front, les particules d'air ambiant se retrouvent «  ject es » au dessus. Ce contournement engendre (ou amplifie) un large vortex situé au front.

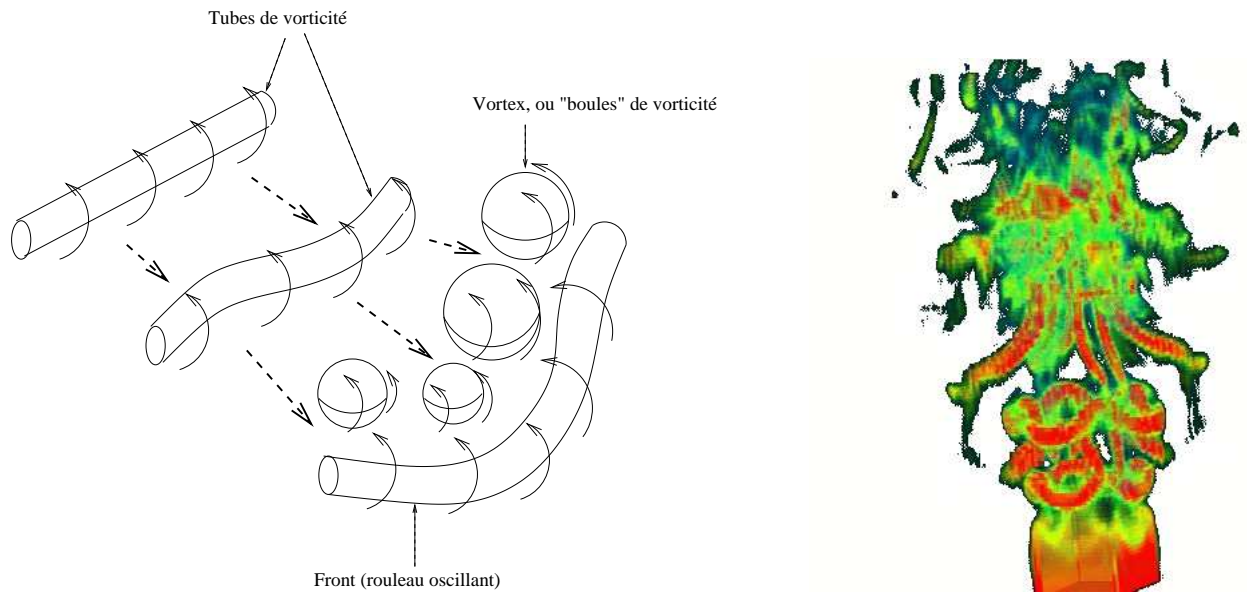


FIG. 3.1 – Rouleaux de vorticité du front et simulation physique fine d’un panache où on a représenté la vorticité (observez les tubes de vorticité initialement refermé en anneaux)

- L’air ainsi déplacé frotte au contact de la coulée en mouvement. Ce frottement rend la pseudo-surface de l’avalanche instable et y génère des oscillations, qui forment des vagues initialement perpendiculaires au sens de la coulée. En s’enroulant sur elles-mêmes, ces vagues se transforment en rouleaux (appelé *tubes de vorticité*).  mises au niveau du front, ces vagues se propagent vers l’arrière (cf figure 3.1).
- Ces tubes sont eux-même instables et oscillent longitudinalement jusqu’à se briser en « boules » (qui sont des boucles de tube isolées). Ces boules de vorticité (ou *vortex*) vont alors migrer sur la partie supérieure de la coulée et donner cette impression de « moutonnement » caractéritique de l’avalanche poudreuse (que l’on retrouve aussi dans d’autres phénomènes comme les nuages convectifs ou la fumée).

Cependant comme dans tout phénomène de fluide turbulent, les vortex apparaissant lors d’une coulée n’ont pas tous le même comportement. Certains vont grossir de plus en plus et donner la forme générale de l’avalanche, d’autres au contraire vont très vite se faire happer par d’autres vortex plus importants et disparaître. Cependant en grossissant, ces vortex deviennent de moins en moins actifs et finissent par disparaître eux aussi, happé à leur tour par un autre vortex plus dynamique ou tout simplement en se désintégrant.

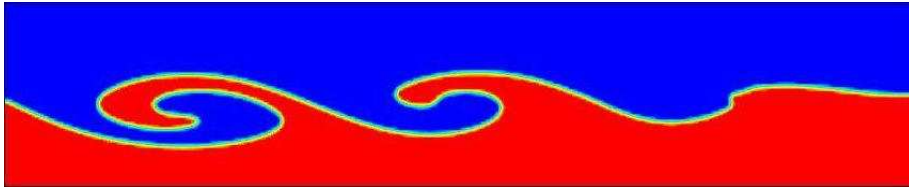


FIG. 3.2 – Instabilité de Kelvin-Helmholtz

Ce phénomène dû aux frottements correspond à un phénomène physique très connu : lorsque deux fluides ayant des vitesses différentes sont en contact, il apparaît alors des *vagues*, c'est l'instabilité de Kelvin-Helmholtz. Ces *vagues* grandissent alors et s'enroulent sur elles-mêmes, jusqu'à former un tourbillon (cf figure 3.2). Dans le cas de l'avalanche, ces vagues apparaissent et se propagent à la surface des vortex. Elles vont grossir jusqu'à devenir elles-mêmes des vortex où apparaîtront alors des « vagues » et ainsi de suite (cf figure 3.3). De ces phénomènes semblables sur plusieurs échelles apparaît une structure hiérarchique.

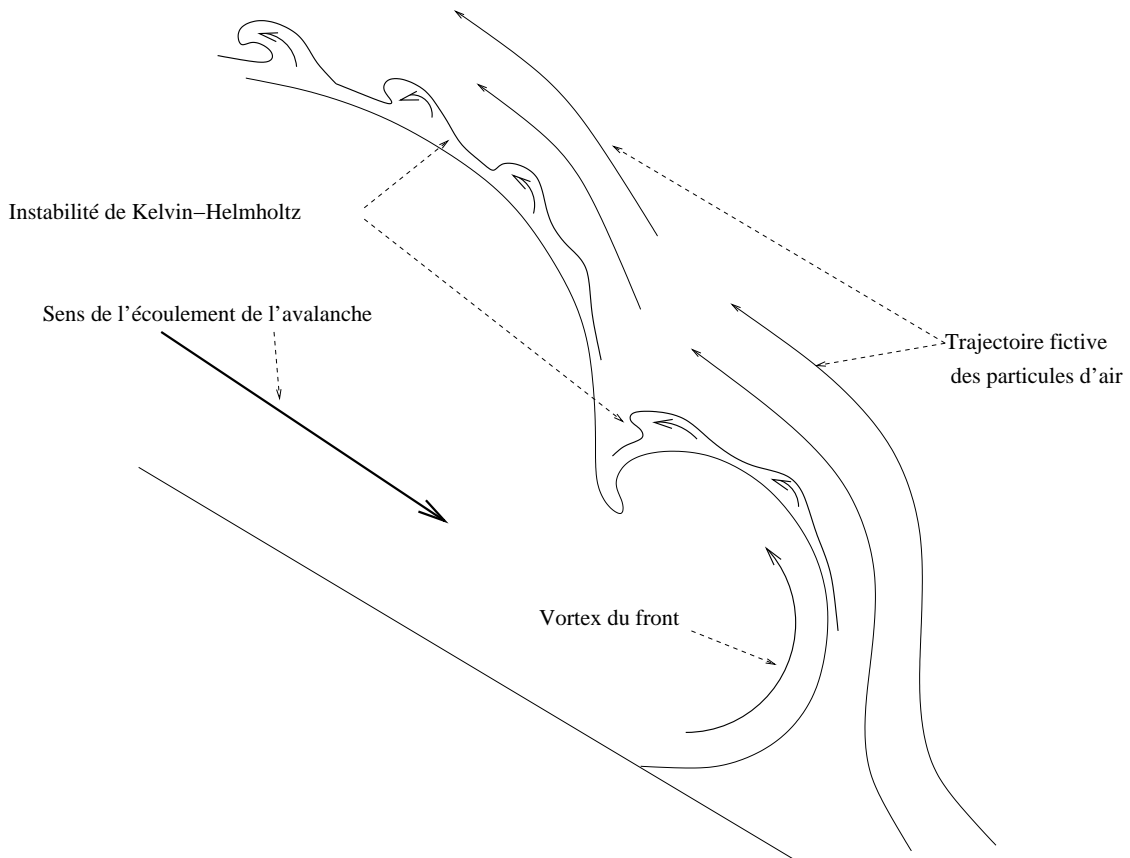


FIG. 3.3 – Coupe de l'avalanche et phénomènes importants

Il est de plus intéressant de remarquer que l'apparence du front en coupe transversale correspond fortement à une demi-'plume' (ou demi-panache), phénomène qui apparaît lorsqu'un fluide pénètre violemment dans un autre au repos (le panache est ici tronqué par le sol, cf figure 3.4).

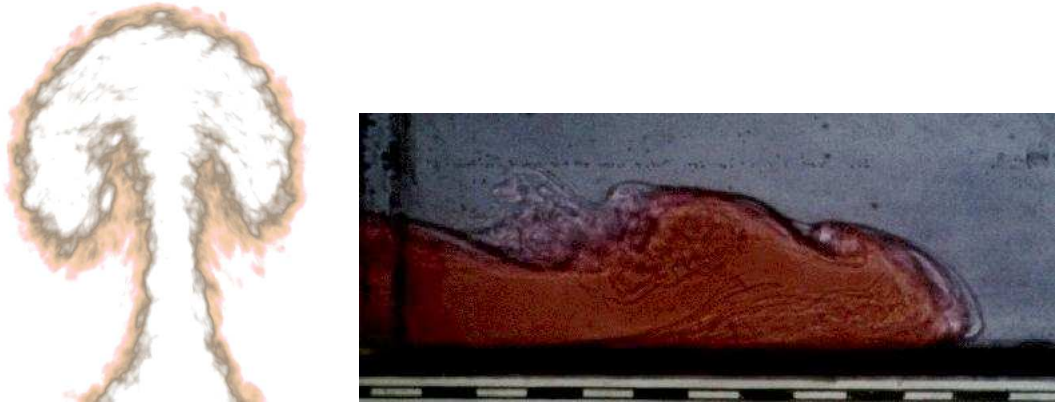


FIG. 3.4 – photo de panache et de demi-panache par une simulation 2D de fluide

3.1.2 Système de particules hiérarchiques

Dans le cadre de la collaboration avec nos partenaires physiciens pour la prévention des risques en montagne, un premier travail avait été effectué par [BH01], mais se limitait aux avalanches de neige dense et aux laves torrentielles. Il n'était donc pas adapté aux avalanches poudreuses. Cependant nous avons repris leur approche se basant sur les systèmes de particules et nous l'avons enrichie afin de permettre de simuler les phénomènes plus complexes que sont les avalanches poudreuses.

3.1.2.1 Application à notre modèle

D'après les observations énoncées plus haut, nous avons choisis de décrire l'avalanche comme un ensemble de vortex évoluant dans l'espace et le temps.

Les systèmes de particules (formalisme décrit en section 2.1.1.4 on page 15) nous apparaissent alors le modèle le plus approprié pour décrire les structures localisées et indépendantes que sont les vortex. On peut en effet représenter un vortex comme une sphère, son rayon défini alors sa zone d'influence sur les autres particules. On lui attribue une vitesse linéaire qui définit sa trajectoire et une vitesse de rotation correspondant à sa vorticité, la rotation se faisant suivant un axe perpendiculaire au sens de la coulée (cf figure 3.5). Chaque particule possède également une durée de vie, la particule étant tuée si son activité (sa vitesse de rotation) tombe en dessous d'un seuil.

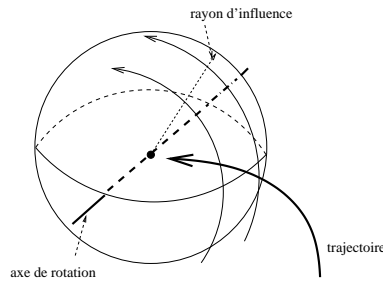


FIG. 3.5 – Représentation d'un vortex

On peut dès lors facilement représenter les tubes de vorticité comme un ensemble de particules chaînées, ce chaînage permettant de plus aux rouleaux de se déformer et d'osciller.

La présence de phénomènes hiérarchiques    différentes échelles nous a conduit à concevoir un système hiérarchique de particules. Chaque niveau hiérarchique contient un système de particules représentant les vortex de même importance (de même échelle). De plus ces systèmes ne sont pas indépendants, la dynamique du système de niveau supérieur étant calculée en fonction de celle du niveau inférieur.

Bien entendu, dans les avalanches réelles, chaque vortex a une importance propre, différente de celle des autres et la répartition des échelles des phénomènes est continue. Nous pouvons cependant catégoriser les vortex selon leur « action » au sein de l'avalanche. Chaque niveau hiérarchique représentera alors une catégorie.

3.1.2.2 Architecture du modèle

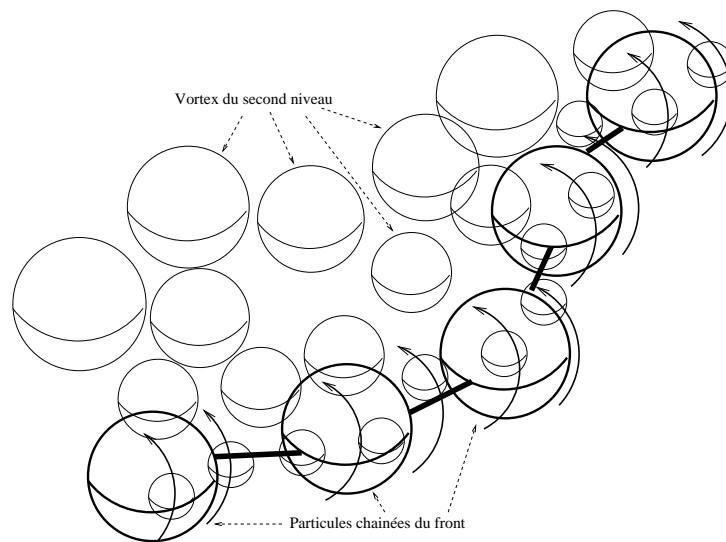


FIG. 3.6 – Le tube de vorticité du front et les vortex générés.

Les particules du premier niveau représentent les vortex présents au niveau du front. Ces particules ne meurent jamais car le front est régénéré constamment par les particules de neige qu'il arrache au manteau neigeux. Ces particules sont chaînées afin de reproduire le comportement d'un tube de vorticité. C'est lui qui donne les caractéristiques générales de l'avalanche : sa vitesse, sa largeur et indirectement sa longueur et sa hauteur (cf chapitre 1).

De ce tube de vorticité présent à l'avant de l'avalanche naissent des vagues qui d g n rent en rouleaux d s à l'instabilité de Kelvin-Helmholtz expliqué plus haut, ces rouleaux finissant après oscillations par se scinder en « boules de vorticité ». Cependant ce processus est très rapide et l'on ne voit finalement émerger du front que les vortex résultants. Les particules du second niveau matérialisent ces vortex résultants. Nous les générons directement depuis les particules du front, sans passer par l'étape des tubes (cf figure 3.6). Ces vortex étant des tubes dégénérés émis par le front, leur dynamique est liée à celle du front. Ces vortex, en grossissant, vont alors donner la forme générale de l'avalanche.

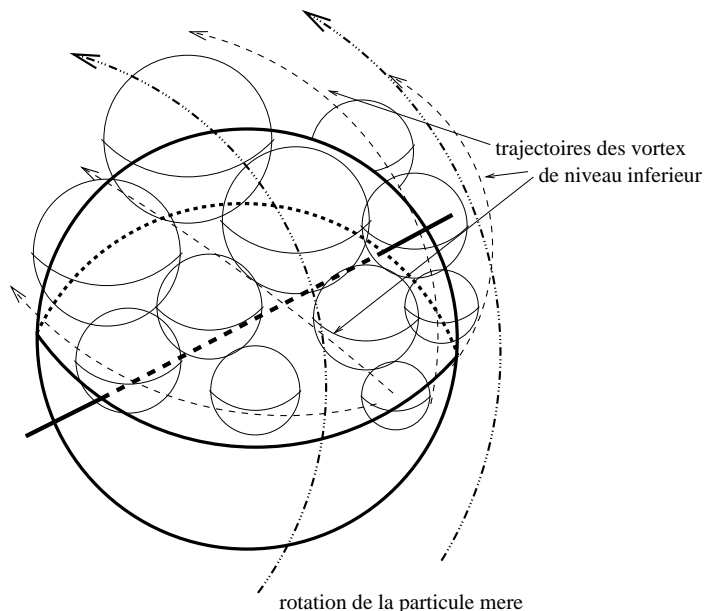


FIG. 3.7 – Trajectoire des vortex des niveaux supérieurs.

Les particules des niveaux supérieurs représentent les « vagues » de différentes échelles qui naissent sur les vortex avant de devenir de réels vortex indépendants à leur tour. Ces vagues se propagent sur la surface des vortex où ils apparaissent et sont étroitement liés à eux. Nous définissons donc la trajectoires des particules de ces niveaux de telle sorte qu'ils restent à proximité de l'enveloppe extérieure de la particule mère, et nous calculons leur vitesse en fonction de sa vitesse de rotation (cf figure 3.7).

3.1.2.3 Les particules de neige

Les particules du dernier niveau représentent des particules de neige. Leur rôle vise à matérialiser la surface de la coulée. Elles n'ont donc pas les mêmes caractéristiques que les autres. En particulier, elles n'ont pas de vitesse de rotation, ni de rayon d'influence.

Elles sont générées au niveau du front et sont ensuite entraînées par les différents vortex. Cependant en suivant les différents vortex, les particules ont tendance à se retrouver à l'intérieur de l'avalanche, alors que seule la partie extérieure, celle que l'on voit, nous intéresse. De plus, afin d'obtenir une bonne représentation de la surface, il nous faut un échantillonnage assez important, nous gagnerions donc fortement à économiser des particules. Nous effectuons pour cela une sorte de recyclage des particules. Cela signifie que nous faisons attention à ce que les particules restent en surface.

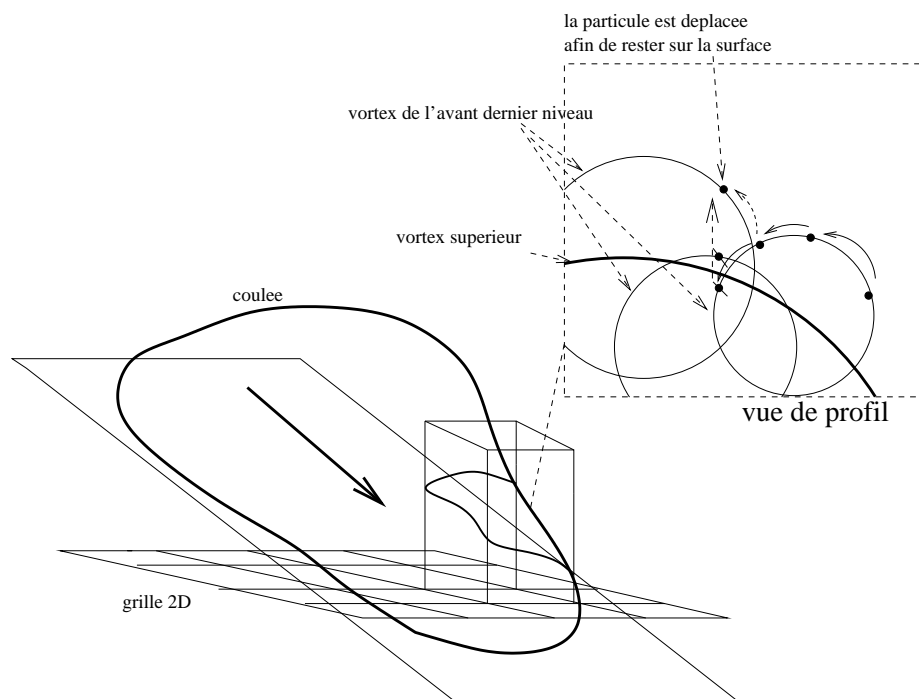


FIG. 3.8 – Grille 2D et entraînement des particules du dernier niveau.

Pour gérer ce rééchantillonnage, nous découpons la coulée en colonnes selon une grille 2D horizontale. Nous stockons dans chaque colonne de la grille la liste des vortex de l'avant dernier niveau hiérarchique (celui dont dépendent les particules de neige) présents à cet endroit (cf figure 3.8). Au moment de calculer la nouvelle position d'une particule, nous allons voir dans quelle colonne elle se situe. Nous cherchons alors le vortex opérant une influence sur la particule qui apparaît à la surface de la coulée. Une fois que nous avons ce vortex, nous déplaçons la particule au niveau de la surface. En réalité chaque particule ne se déplace pas exactement sur la surface mais dans un voisinage proche. Elles se situent donc

dans une pseudo-surface, c'est à dire une surface avec une épaisseur fixée (par l'utilisateur). Cette épaisseur nous permettra par la suite de simuler une interface floue (cf figure 3.9 et partie 3.2.2.2)

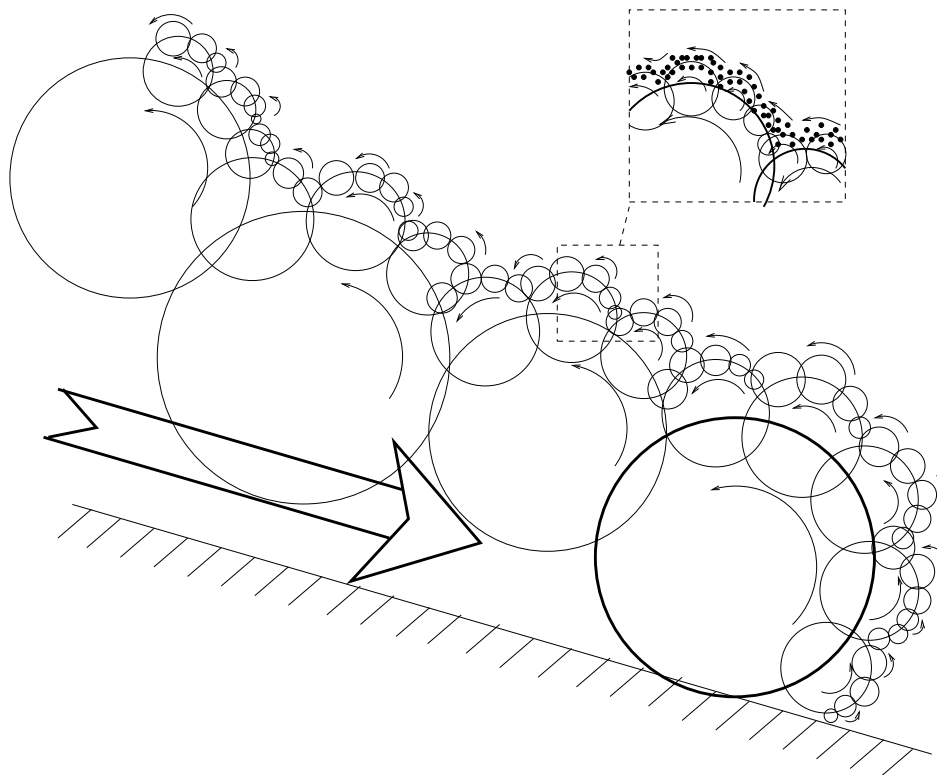


FIG. 3.9 – Schéma d'architecture du modèle

3.1.3 Les lois de comportement

Maintenant que nous avons vu comment notre modèle était construit, nous allons exposer les lois de comportement que nous avons choisi pour régir nos systèmes de particules.

3.1.3.1 Un modèle couplé avec la physique

Dans le cadre de la collaboration avec les physiciens du CEMAGREF, du LEGI et du LMC, il avait été convenu que les résultats d'une simulation numérique grossière (résolution spatiale de l'ordre du mètre et temporelle de l'ordre de la seconde) nous seraient fournis. Nous devons obtenir un champ de vitesse en deux dimensions (i.e. en vue de dessus) pour chaque pas de temps.

L'idée est alors de coupler ce modèle physique à échelle grossière à notre modèle à échelle fine. C'est à dire que nous nous servons de ces champs de vitesses précalculés comme base de notre simulation pour décrire l'évolution générale de l'avalanche (vitesse

générale et vitesse du front) puis nous utilisons notre modèle pour enrichir cette simulation et la rendre visuellement crédible.

3.1.3.2 Champs de vitesses de l'avalanche

Chaque niveau hiérarchique, représentant une classe de phénomènes distincts, possède son propre champ de vitesses.

Premier niveau (animation globale) Le champ de vitesses du front, qui conditionne la vitesse globale de l'avalanche nous est à priori fourni par la simulation précalculée, supposée physiquement valide. Dans l'attente de disponibilité des données de simulation, nous avons également développé un module autonome très simple de calcul de ce champ de vitesses. Dans ce module, la vitesse est calculée selon les lois de la dynamique du point sur un plan incliné, l'angle de la pente pouvant éventuellement varier (cf figure 3.10).

Nous tenons également compte des frottements avec l'air pour moduler cette vitesse et obtenir un comportement plus réaliste, en particulier l'apparence linéique du front. Ainsi, si un vortex du front prend de l'avance sur le reste du front, il sera soumis plus fortement aux frottements avec l'air ambiant ce qui va avoir pour conséquence de le ralentir, et inversement si le front le dépasse, il sera moins soumis aux frottements et accélèrera. D'où en résulte le comportement oscillatoire du front recherché.

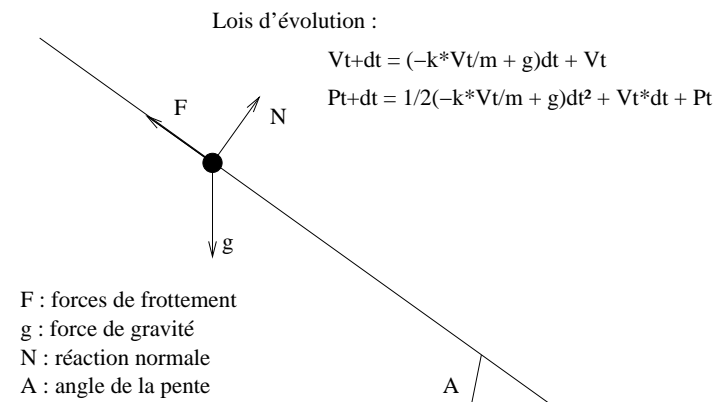


FIG. 3.10 – Schéma du plan incliné

Niveaux supérieur (habillage de la simulation) Les vortex du deuxième niveau représentent les vortex les plus importants, ceux qui donnent la forme générale de l'avalanche. Leur vitesse initiale est fournie par la particule du front qui les génère. Ensuite ces vortex, suivant leur taille et leur position au sein de l'avalanche seront plus ou moins fortement soumis aux frottements (cf figure 3.11).

Nous calculons donc les vitesses des particules du deuxième niveau en tenant compte des frottements de ceux-ci avec l'air (k), de leur taille (r) et de leur position par rapport à la surface ($P - P_s$) selon les équations empiriques ($Rand$ correspond à un coefficient aléatoire entre 0 et 1, C_1 et C_2 sont des constantes) :

$$V_{t+dt} = -(dt * k * Rand * \frac{r}{C_1}) + V_t + C_2(P - P_s)$$

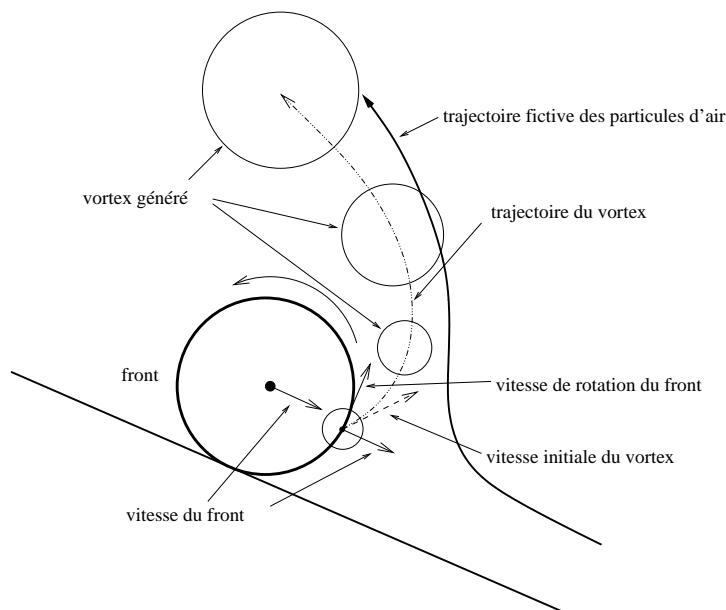


FIG. 3.11 – Calcul de la trajectoire d'un vortex de deuxième niveau

Pour les niveaux supérieurs, la vitesse des vortex est directement dépendante de la vitesse de rotation du vortex porteur. Nous calculons donc leur position uniquement en fonction de la vitesse de rotation de la particule mère.

3.1.3.3 Représentation de l'activité de l'avalanche

Une des caractéristiques essentielle de notre modèle est de pouvoir permettre au graphiste de contrôler facilement les différents aspects de l'avalanche. Nous avons pour cela introduit quatre paramètres importants.

Le premier est le *coefficient de couplage* avec l'air. En effet, dans notre modèle la dynamique d'un niveau hiérarchique repose sur celle du niveau inférieur et plus particulièrement sur ce que nous avons appelé son « activité » qui correspond à la vorticité des particules, c'est à dire à leur vitesse de rotation. Or, comme nous l'avons expliqué plus haut (cf section ??), cette vorticité est induite par les frottements qui s'effectuent entre les vortex de l'avalanche et l'air ambiant. Les vortex descendant la pente, se retrouve en contact avec

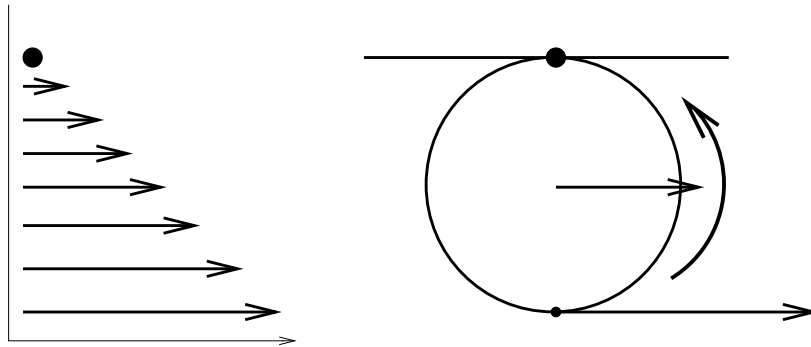


FIG. 3.12 – Profil de vitesse moyen dans le référentiel de l’air et interprétation en terme de rotation du vortex

l’air immobile. Le vortex se met alors à « rouler » sur la couche d’air de la même façon qu’une roue sur le sol (cf figure 3.12).

Lorsque le couplage est total entre le vortex et l’air, la vitesse de rotation s’exprime par l’équation :

$$V_{rot} = -\frac{V}{r}$$

Dans le cas d’un couplage partiel :

$$V_{rot} = -k * \frac{V}{r}$$

k étant le coefficient de couplage, V la vitesse du vortex et r son rayon. Normalement la valeur de k dépend des propriétés des fluides (vent, masse volumique, taux d’humidité etc.), cependant nous laissons le choix de la valeur de ce paramètre à l’utilisateur qui peut alors contrôler la dynamique de chaque niveau. Au besoin, k peut même varier au cours du temps.

Le deuxième paramètre pris en compte, correspond à la *réactivité* R du vortex. En effet, une fois mis en route, un vortex tend à se maintenir (l’inertie engendre une « mémoire »). Une réactivité forte correspond à une mémoire faible.

Nous calculons alors la vitesse par l’équation :

$$V_{rot}^t = -R * k * \frac{V^t}{r} + (1 - R)V_{rot}^{t-dt}$$

Les derniers paramètres N et F permettent de moduler la *turbulence* de l’avalanche. Ce sont des coefficients qui viennent moduler le nombre de vortex et leur fréquence de génération. En effet plus nous générons de vortex plus les particules de neige ont une trajectoire turbulente, passant alternativement des uns aux autres. Ces deux paramètres

(nombre et fréquence de génération) sont dépendants de la vitesse et de l'activité du vortex générateur.

Nous calculons donc, à chaque pas de temps, et en fonction de l'activité du vortex et du paramètre F , un seuil de génération de vortex, puis si ce seuil est atteint, nous calculons de la même manière (en fonction de l'activité du vortex et du paramètre N) le nombre de vortex à générer.

A noter que si le graphiste le souhaite, ces différents paramètres peuvent très bien avoir des valeurs différentes suivant le niveau hiérarchique.

3.1.3.4 Entraînement des particules de neige

Le modèle que nous avons retenu pour l'entraînement des particules est celui de Tochon-Danguy [CR02]. Il correspond au mécanisme suivant : pendant un temps dt , la coulée avance d'une longueur $dx = U_f dt$, U_f représentant la vitesse du front, et entraîne un volume de neige de taille $dx * \beta h_N$ où h_N correspond à l'épaisseur du manteau neigeux et β au pourcentage de la hauteur de neige entraînée. Cela revient à dire qu'au fur et à mesure que la coulée avance, elle prélève en bloc une partie de la couche neigeuse sur laquelle elle vient juste d'arriver, comme l'illustre la figure 3.13. Ce type de modélisation de l'entraînement de neige par la coulée est le plus simple que l'on puisse envisager. Il est fort probable que l'entraînement de neige ne se passe pas aussi simplement ; cependant à l'heure actuelle, la manière dont s'effectue le phénomène n'est toujours pas bien connue. De plus, ce modèle donne à l'animateur un moyen simple, le coefficient β , de contrôler la puissance d'entraînement des particules.

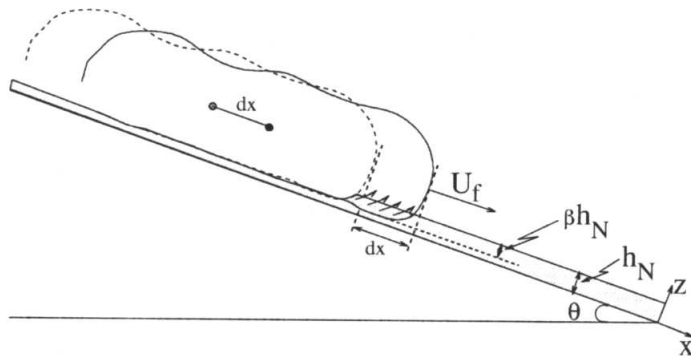


FIG. 3.13 – Illustration du mécanisme d'entraînement des particules [CR02]

Nous nous servons de cette loi pour calculer le volume des particules représentant le front, puis ensuite le volume des autres particules qui sont générées par le front. Cela revient

à incorporer le volume de neige entraînée dans les vortex du front puis à le redistribuer aux autres vortex au fur et à mesure. La puissance de l'entraînement des particules, c'est à dire la quantité de neige arrachée au manteau neigeux détermine alors le volume total de l'avalanche.

Il est important de préciser que dans les phénomènes aussi complexes que sont les avalanches de neige poudreuse, le chaos joue un rôle actif et c'est pourquoi nous avons introduit de l'aléatoire dans notre modèle pour perturber les paramètres des particules et les lois d'évolutions.

3.2 Le rendu

L'animation nous permet ainsi de modéliser la dynamique de l'avalanche. Cependant pour que la simulation soit visuellement réaliste il faut « habiller » ce modèle particulière. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, plusieurs techniques existent pour rendre des phénomènes dont la surface est floue tels que les nuages ou la fumée.

3.2.1 Choix du rendu

Dans notre cas on récupère suite à la simulation, un nuage de points réparti relativement uniformément sur une pseudo-surface floue (cf figure 3.9 on page 28). Dès lors plusieurs choix sont possibles :



FIG. 3.14 – Rendu à base de “sprites”

La technique des « sprites » était celle retenue par [BH01] pour modéliser leurs avalanches denses. Cette méthode consiste à appliquer sur les particules de rendu une texture en forme de sphère que l'on rend plus ou moins transparente selon la distance au centre. Elle permet de rendre des avalanches denses avec un certain réalisme. Cependant, à moins

de mettre énormément de particules de très petite taille ce qui ne serait pas raisonnable en terme de coût de calcul, elle donne un résultat beaucoup trop granuleux pour une avalanche poudreuse (cf figure 3.14).

La deuxième méthode qui semblait intéressante pour notre problème est celle des hypertextures animées [Ney03]. Nous avons déjà expliqué le principe des hypertextures [PH89] dans l'état de l'art (cf chapitre 2 on page 13). La technique des textures animées consiste à advecter une texture le long du fluide. Les détails apportés par la texture se déplacent alors le long du fluide, donnant l'impression d'un fluide à haute résolution.

3.2.2 Les hypertextures animées

3.2.2.1 Principe

Dans le cas d'une approche Eulerienne, à un instant initial, une texture est appliquée sur une grille contenant le fluide. Ensuite, au cours du temps, les coordonnées de textures sont advectées dans la grille en fonction du champ de vitesse.

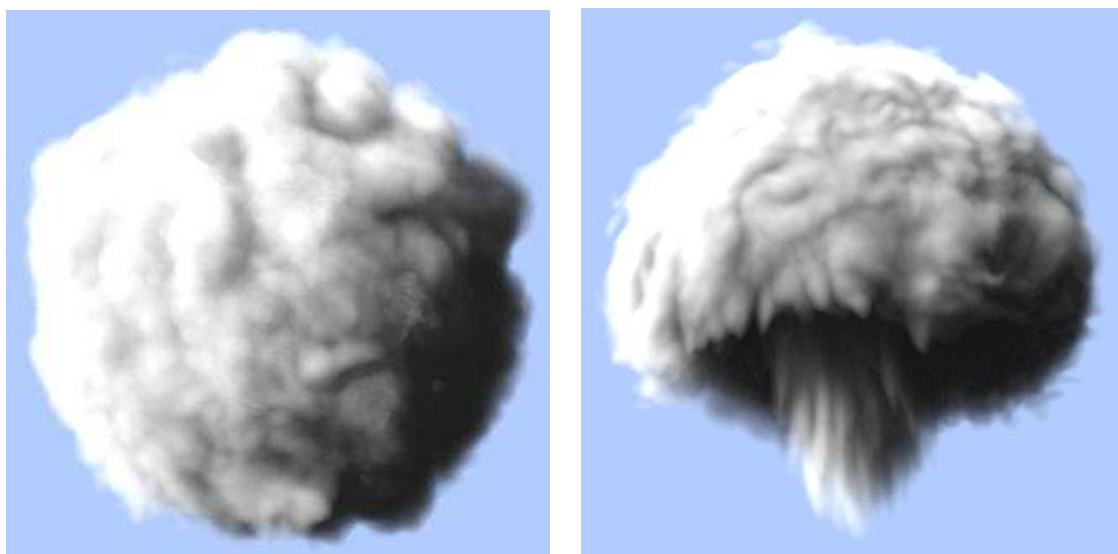


FIG. 3.15 – Hypertexture, et hypertexture animée (la grille de simulation correspondante est $8*8*8$)

Cependant l'advection des coordonnées de textures finit par entrainer une trop grande déformation de la texture (impression de pate à modeler complètement étirée). La texture a donc besoin d'être régénérée périodiquement, c'est à dire que les coordonnées de textures sont réinitialisées aux coordonnées de la grille après une certaine durée de vie (appelé *latence*) τ . Afin d'assurer la continuité temporelle, on compose trois textures avec un déphasage de $\frac{2\pi}{3}$ (on s'assure ainsi un poids total constant), chacune se voyant attribuer un

coefficient de poids σ tombant à zéro au début et à la fin de sa vie, *i.e.*, $\frac{1}{2}(1 - \cos(2\pi\frac{t}{\tau}))$. Cette technique fonctionne très bien avec des textures pseudo-périodiques grâce à une illusion d'optique animée : en suivant un élément qui disparaît, l'oeil finit par le confondre avec ceux qui l'entoure plutôt qu'avec lui-même réinitialisé. L'oeil a alors l'impression que l'élément poursuit son chemin dans le fluide alors qu'il reste dans le même voisinage.

L'emploi d'hypertextures [PH89] permet de rendre des phénomènes ou objets (enveloppes) avec une interface floue (cf figure 3.15). Ces textures sont procédurales; elles sont en fait des généralisations triviales du cas surfacique, et comme elles ne nécessitent aucune mémoire, il est possible, en introduisant le temps comme quatrième dimension dans les paramètres procéduraux, d'animer les détails de petite échelle de la texture (de résolution inférieure à la simulation) ce qui renforce ainsi l'illusion de mouvement.

3.2.2.2 Application aux avalanches

Nos primitives de mouvement dédiées au rendu sont les particules du dernier niveau hiérarchique, nous nous situons donc plutôt dans une approche Lagrangienne. Dans l'esprit de cette approche et des textures advectées, nous allons partir d'une texture à haute résolution représentant l'aspect de l'avalanche, puis nous allons laisser le fluide « emporter » ce motif. Pour cela, on dote chaque particule d'un système de coordonnées de texture¹.

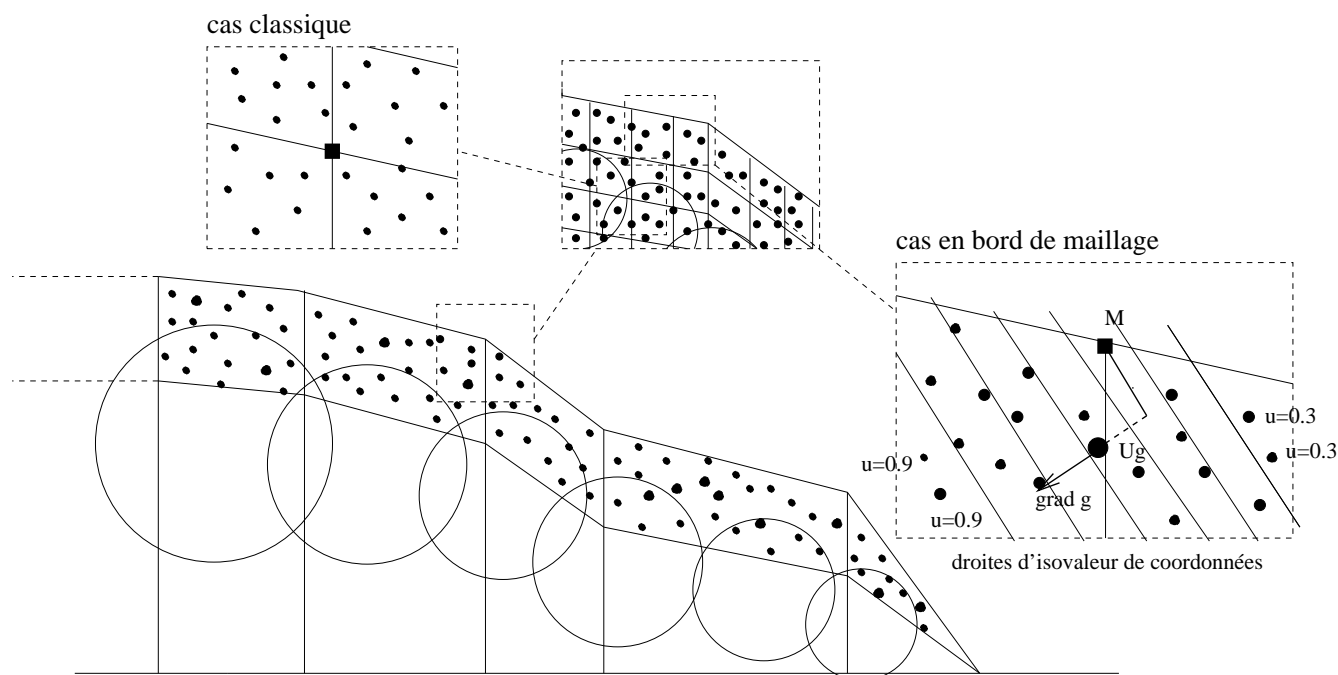


FIG. 3.16 – Illustration en coupe 2D verticale du maillage de la pseudo-surface.

¹Comme expliqué plus haut, il y a en fait trois systèmes de coordonnées correspondant aux trois textures déphasées. Cependant pour plus de clarté, nous expliquerons la méthode avec un seul système.

Malheureusement nous ne pouvons tracer directement une texture distordue par des particules, car nous ne savons texturer que des polygones. Nous créons donc un maillage englobant l'épaisseur de la pseudo-surface (cf figure 3.16), et c'est ce maillage qui servira de support à la texture. Ce maillage est basé sur celui utilisé pour l'advection des particules de neige. Cela nous permet de récupérer rapidement la hauteur en chaque noeud de la pseudo-surface, celle-ci étant liée à la position du plus haut vortex. Nous connaissons également l'épaisseur de la pseudo-surface puisqu'elle est définie par l'utilisateur, on obtient donc directement un encadrement de la pseudo-surface.

Le problème est alors de calculer la valeur des coordonnées de texture pour chaque noeud du maillage à partir de celles des particules. Pour chaque noeud, l'idée est de calculer ses coordonnées de textures comme étant le barycentre des coordonnées de textures des particules présentes dans les cases adjacentes. Cette idée fonctionne bien dans le cas où la répartition des particules autour du noeud est suffisante et homogène car le centre de gravité de l'ensemble des points coïncide alors avec le noeud (cf figure 3.16).

Cependant si la distribution n'est pas idéale, l'approximation de la valeur au noeud est faussée (car le barycentre ne coïncide pas avec le noeud). Ce problème se pose dans deux cas de figure : si le nombre de particules est insuffisant, ou si le noeud est situé sur le bord du maillage. Dans ces cas là, nous supposons que, localement, l'évolution des valeurs des coordonnées est linéaire. Les courbes d'isovaleurs des coordonnées de textures sont donc des droites parallèles régulièrement réparties. Nous calculons alors la valeur des coordonnées de texture et le gradient au centre de gravité G , la valeur des coordonnées de textures au noeud M est alors donné par l'équation :

$$u_M = u_G + \vec{GM} \cdot \vec{\nabla} u_G$$

De plus, nous pondérons l'influence de chaque particule par une fonction de poids dépendant de la distance de celle-ci au noeud en question. Cela évite les effets de saut lorsqu'une particule change de maille.

Une fois que les coordonnées de texture sont calculées en chaque noeud du maillage, nous effectuons le rendu à proprement parlé. Comme nous avons en réalité un maillage 3D, il nous faut employer une méthode volumique (le formalisme reste indentique). Nous utilisons la technique des *slices* expliquée à la section 2.2.3.2 qui offre l'avantage de se servir de l'accélération de la carte graphique.

Chapitre 4

Application et résultats

Tout d'abord, nous tenons à préciser que l'implémentation de la partie rendu n'est pas terminée et fera l'objet d'une prolongation de stage au cours de l'été. Nous présenterons donc uniquement les résultats de notre modèle d'animation, néanmoins les figures 3.15 et 4.1 permettent de se faire une idée du rendu final.

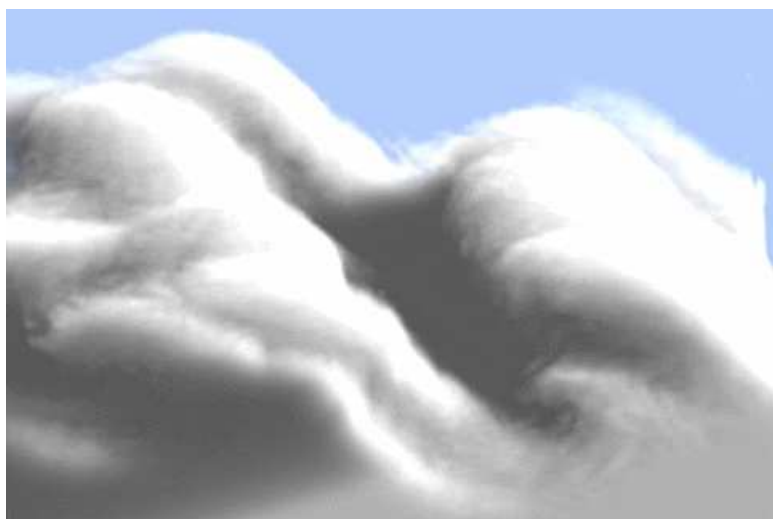


FIG. 4.1 – Rendu par hypertexture

De plus, étant donné qu'aucun modèle n'a été développé sur les avalanches poudreuses en synthèse d'image, le seul moyen d'évaluation et de validation de notre modèle repose sur une comparaison qualitative avec des avalanches réelles.

4.1 L'interface et la paramétrisation

Nous avons essayer de rendre l'interface la plus intuitive et la plus pratique possible.

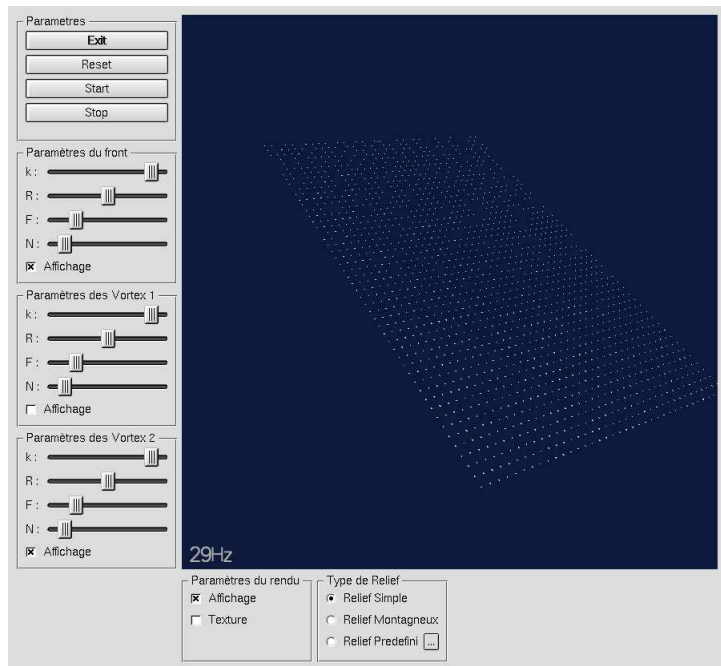


FIG. 4.2 – Interface du programme de simulation : chacun des quatre paramètres principaux sont modifiables indépendamment

Tout les paramètres de l'application sont des valeurs comprises entre 0 et 1. L'utilisation de *sliders* permet de rendre la paramétrisation intuitive d'autant que la réactivité de la simulation permet de bien « sentir » leurs effets.. A noter que les paramètres sont modifiables en cours de simulation augmentant ainsi le panel de comportements. De plus pour avoir une idée précise de l'aspect de l'avalanche, il est possible d'afficher les différents niveaux hiérarchiques. Les autres paramètres modifiables sont :

- La proportion de neige entraînée qui donnera la volume de l'avalanche (le coefficient β vu à la section ??).
- La largeur du front.

4.2 Résultats

Les figures 4.3 à 4.7 représentent les quelques uns des comportements possibles d'avalanches.

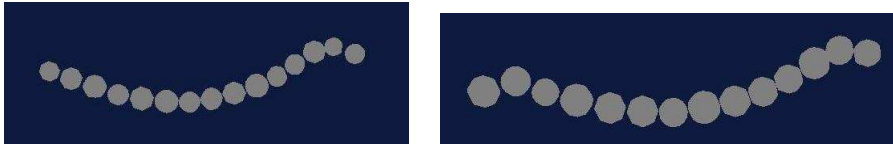


FIG. 4.3 – oscillation du tube de vorticité du front

Le nombre de particules générées par la simulation diffère beaucoup suivant le comportement que l'on donne à son avalanche. En effet ce nombre varie entre quelques milliers pour une très petite avalanche et plusieurs centaines de milliers pour une grosse avalanche active. Néanmoins pour une avalanche moyenne, le nombre de particule (de neige essentiellement) avoisine les cinquante mille.

Un résultat intéressant concerne la vitesse d'animation. En effet celle-ci bien qu'étant très dépendante de la puissance de la machine et du nombre de particules générée lors de la simulation, tourne pour une machine équipée d'un Pentium IV   2.4 GHz avec le pré-rendu sous forme de points (cf figure 4.7) quasiment en temps réel (environ 15 images/seconde). Cette interaction directe sera très utile pour le graphiste afin de mettre au point le comportement voulu avant d'exécuter le rendu final.

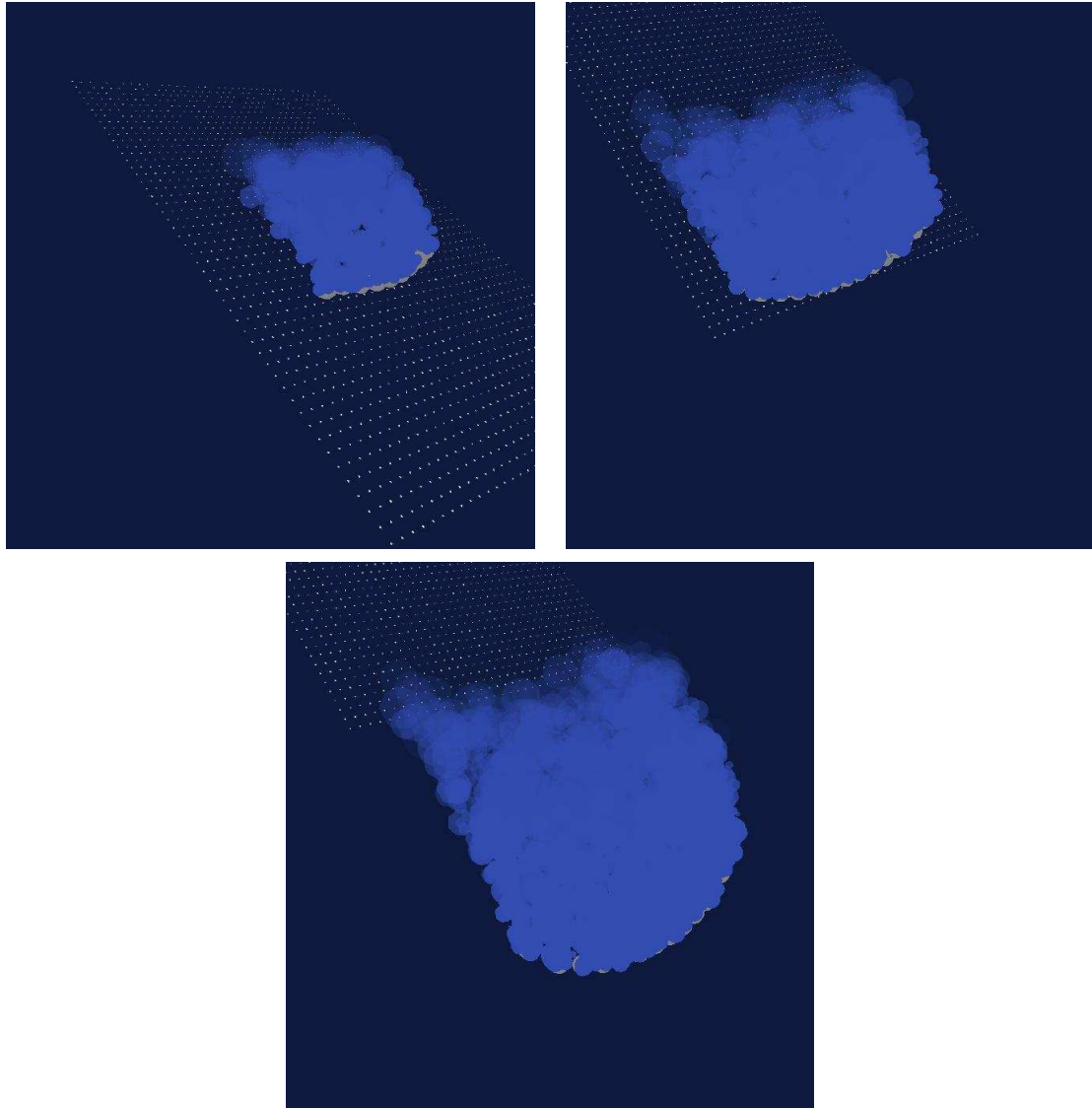


FIG. 4.4 – Avalanche de faible longueur. Seul les deux premier niveaux hiérarchiques sont ici affichés. Environ 2000 particules.

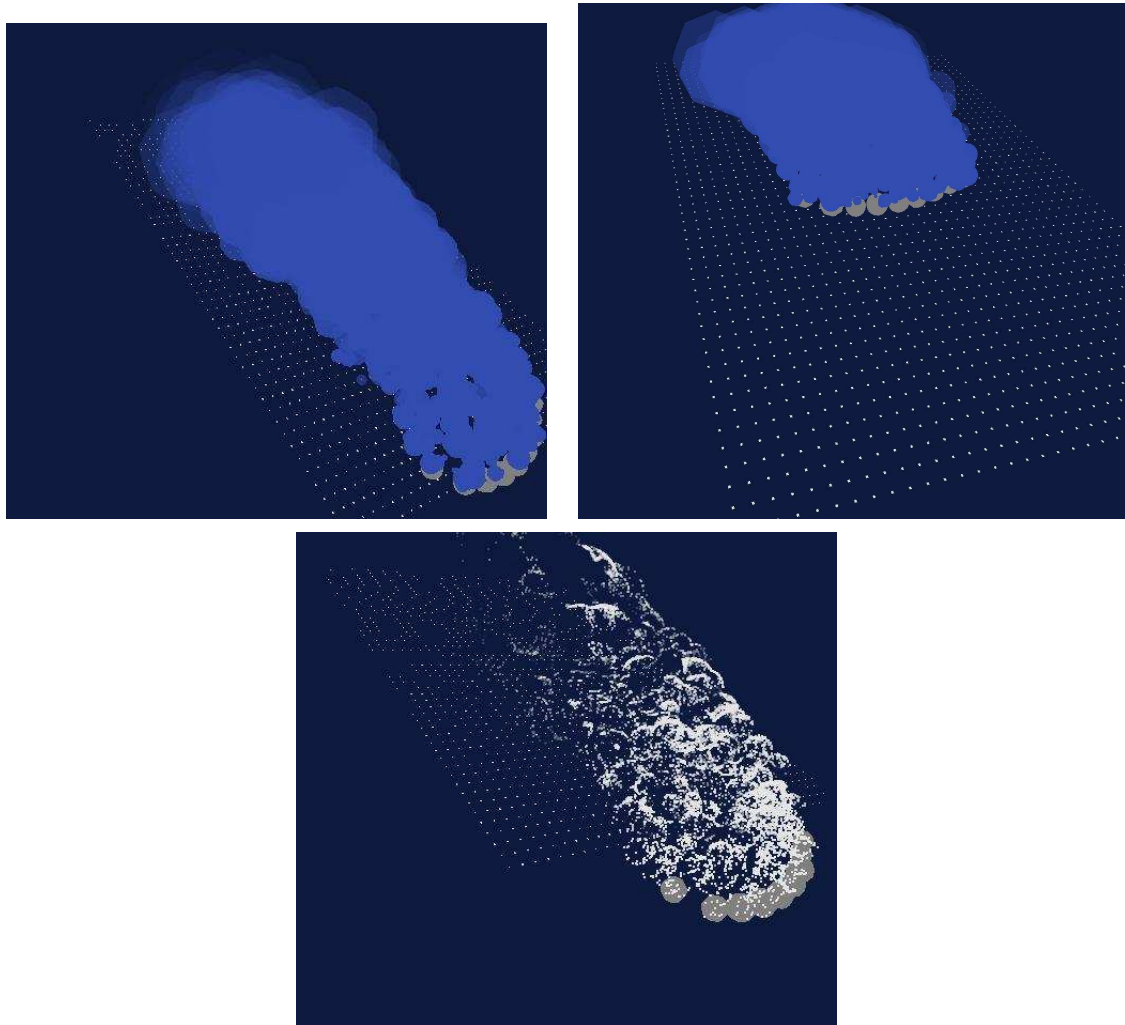


FIG. 4.5 – Avalanche de grande amplitude (5000 particules). Pour la dernière image, on affiche uniquement les particules du front et les particules de neiges (20000 particules).

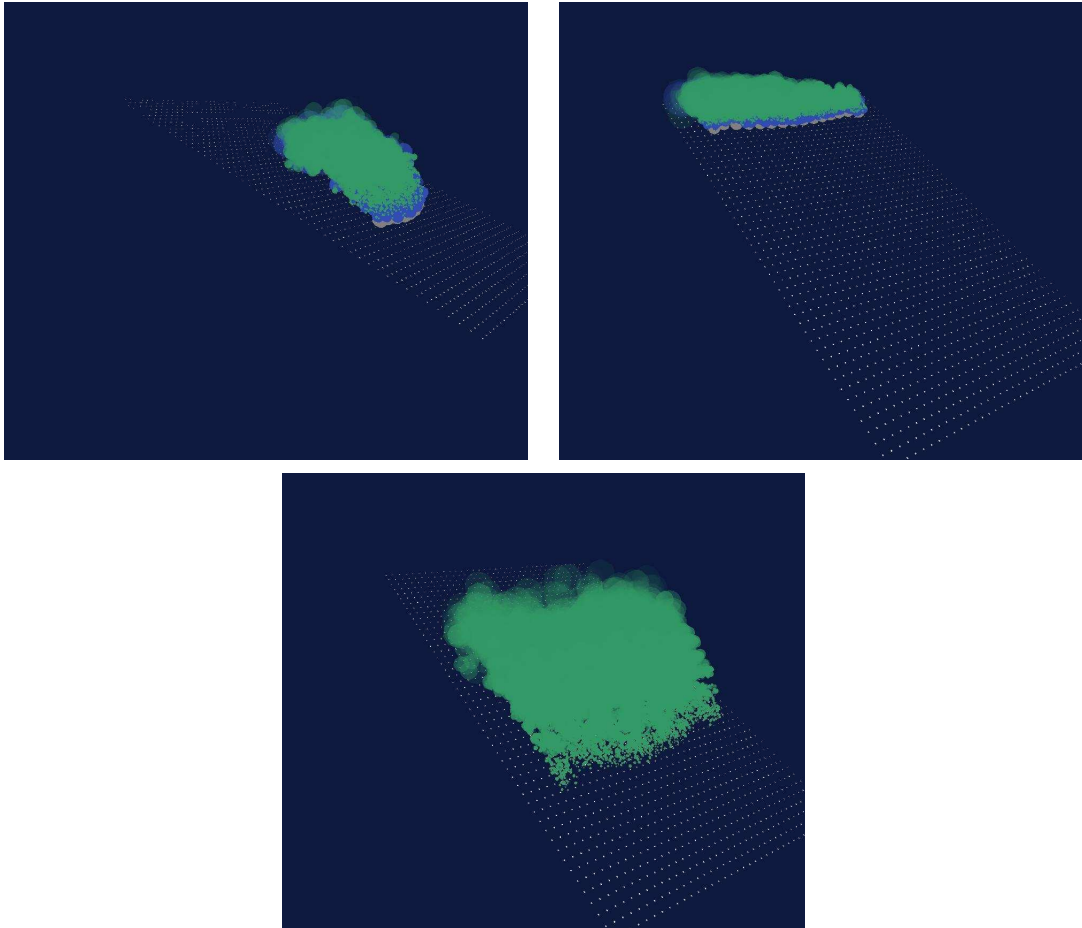


FIG. 4.6 – Avalanche avec une forte activité (12000 particules). A noter sur la dernière image représentant uniquement le niveau hiérarchique supérieur, les petites particules qui représentent les *vagues* qui ne se sont pas encore transformées en vortex.

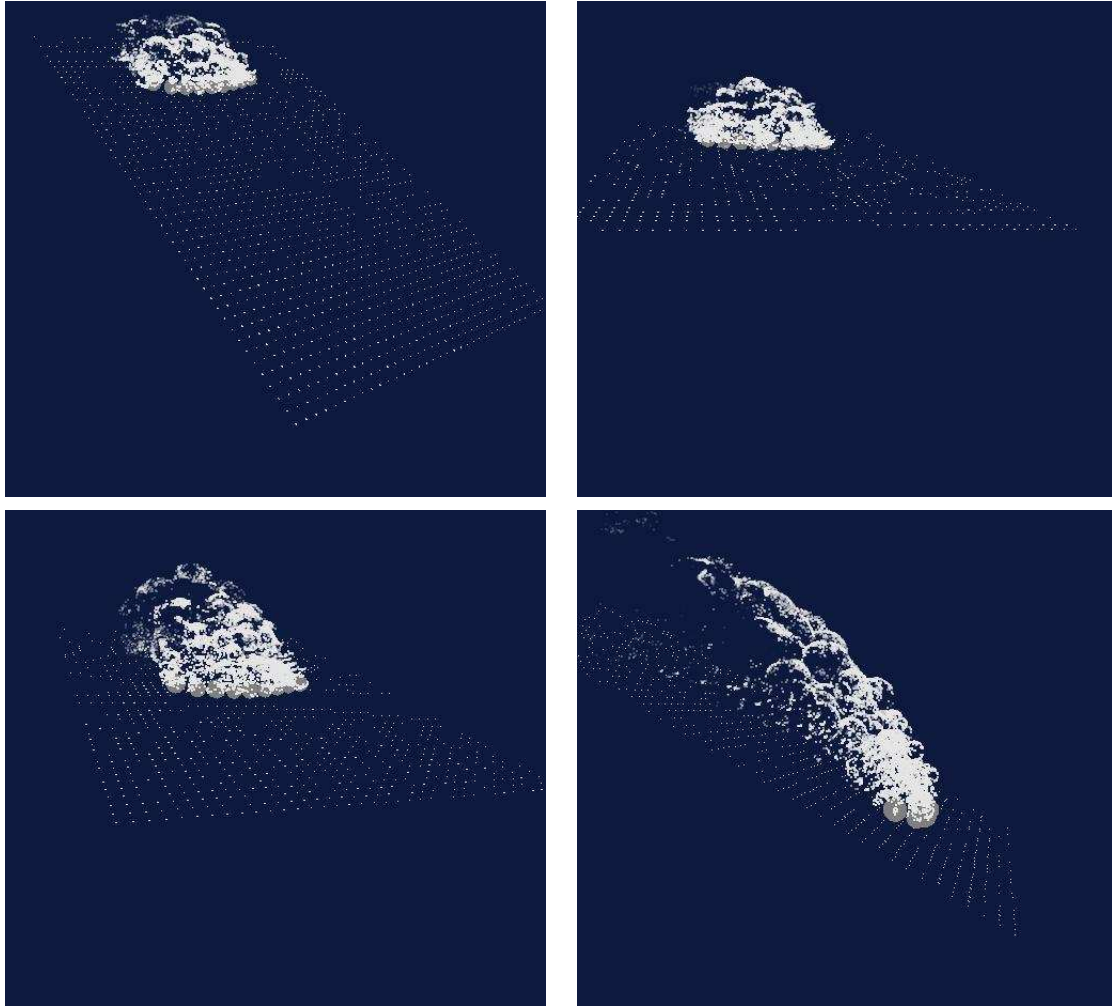


FIG. 4.7 – Séquence d'image tirée d'une simulation en vue d'obtenir une avalanche poudreuse valable ($k=0.8$, $R=0.5$, $F=0.2$, $N=0.1$). La représentation s'effectue uniquement avec la particule du dernier niveau. On remarque néanmoins aisément les vortex (60000 particules).

Conclusion et perspectives

Nous avons, au cours de ce stage, mis au point une méthode de modélisation des avalanches poudreuses, modélisation encore inexistante dans le domaine de la synthèse d'images. Nous avons pour cela développé un modèle théorique complet, animation et rendu, et nous avons implémenté le modèle d'animation. Cette modélisation pourra alors être utilisée pour l'aide à la décision des risques en montagne (objectif principal du projet) mais pourra aussi servir dans le domaine de l'audiovisuel.

L'approche que nous avons employée est type phénoménologique : nous avons modélisé l'avalanche par des systèmes de particules hiérarchiques représentant les structures spécifiques du phénomène qui sont gouvernés par des lois empiriques. Ce modèle efficace permet une interaction quasi temps réel du graphiste avec son animation, et lui offre également un certain nombre de paramètres contrôlant l'aspect et la dynamique de l'avalanche.

Il reste néanmoins énormément de travail à réaliser, et les directions de recherche sont nombreuses et diverses. Il faut bien sûr à cours terme réaliser l'implémentation du modèle de rendu. Ce travail sera réalisé dans le cadre de la prolongation de mon stage. Nous pourrons alors valider le modèle dans sa totalité. L'optimisation du modèle d'animation devrait permettre d'obtenir un pré-rendu temps réel, la vitesse moyenne obtenue à l'heure actuelle se situant autour de 15 images par seconde.

Il serait judicieux afin de renforcer le réalisme de permettre l'interaction de la coulée avec d'autres objets (arbres, maisons etc.). [BH01] ont d'ailleurs effectué un premier travail dans ce sens qui devrait être facilement réutilisable.

Un autre axe de recherche qu'il serait bon d'explorer concerne la souplesse de la simulation multi-échelle. Nous sommes actuellement obligés de simuler pour une question de cohérence spatiale l'avalanche dans sa totalité, cependant il serait envisageable de repérer la position de la caméra et la partie de l'avalanche qui est affichée à l'écran et ne simuler les petits détails que dans le voisinage de la fenêtre.

En conclusion, nous pouvons dire que ce modèle bien qu'étant très perfectible, constitue une avancée dans la modélisation visuelle de phénomènes fluides turbulents. Néanmoins nous en sommes plus au début qu'à la fin.

Bibliographie

- [AA02] Trembilski A. and Brossler A. Transparency for polygon based cloud rendering. In *ACM Symposium on Applied Computing*, pages 785–790, 2002.
- [Ava02] Avalanche.org, 2002. <http://www.avalanche.org>.
- [BH01] Florence Bertails and Damien Hinsinger. Simulation d’avalanches et de laves torrentielles par synthèse d’images. Technical report, ENSIMAG-iMAGIS/GRAVIR, sep 2001.
- [Clé99] Marie Clément. Une avalanche aérosol comme écoulement turbulent diphasique : Etude préalable à une simulation dans l’air. Technical report, Université J. Fourier-Grenoble I-Ecole Normale Supérieure de Lyon, 1999.
- [CR02] Marie Clément-Rastello. *Etude de la dynamique des avalanches de neige en aérosol*. PhD thesis, Centre d’Etude du Machinisme Agricole du Génie Rural et Forestier and Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, sep 2002.
- [DC96] Mathieu Desbrun and Marie-Paule Cani. Smoothed particles : A new paradigm for animating highly deformable bodies. In R. Boulic and G. Hegron, editors, *Computer Animation and Simulation '96 (Proceedings of EG Workshop on Animation and Simulation)*, pages 61–76. Springer-Verlag, Aug 1996. <http://www-imagis.imag.fr/Publications/1996/DC96b>.
- [DGA01] F. Dufour, U. Gruber, and W. Ammann. Avalanches : études effectuées dans la vallée de la sionne en 1999, 2001.
- [DKY⁺00] Yoshinori Dobashi, Kazufumi Kaneda, Hideo Yamashita, Tsuyoshi Okita, and Tomoyuki Nishita. A simple, efficient method for realistic animation of clouds. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 19–28, July 2000.
- [Fea00] Paul Fearing. Computer modelling of fallen snow. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 37–46, July 2000.
- [FF01] Nick Foster and Ronald Fedkiw. Practical animations of liquids. In Eugene Fiume, editor, *SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings*, pages 23–30. ACM Press / ACM SIGGRAPH, 2001.
- [FM96] Nick Foster and Dimitri Metaxas. Realistic animation of liquids. *Graphical models and image processing : GMIP*, 58(5) :471–483, 1996.

- [FM97] Nick Foster and Dimitri Metaxas. Controlling fluid animation. In *Proceedings CGI '97*, pages 178–188, 1997.
- [FSJ01] Ronald Fedkiw, Jos Stam, and Henrik Wann Jensen. Visual simulation of smoke. In Eugene Fiume, editor, *SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings*, pages 15–22. ACM Press / ACM SIGGRAPH, 2001.
- [Gam94] Manuel Noronha Gamito. Simulation of turbulent flow using vortex particles. *Graphical models and image processing : GMIP*, 1994.
- [Gar84] Geoffrey Y. Gardner. Simulation of natural scenes using textured quadric surfaces. In *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 84)*, volume 18, pages 11–20, July 1984.
- [Gar85] Geoffrey Y. Gardner. Visual simulation of clouds. In *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 85)*, volume 19, pages 297–303, July 1985.
- [Gra02] Gravity currents, 2002.
<http://www.damtp.cam.ac.uk/user/fdl/people/jes14/jeshome.htm>.
- [LF02] Arnauld Lamorlette and Nick Foster. Structural modeling of flames for a production environment, 2002.
- [LHVD95] A. Luciani, A. Habibi, A. Vapillon, and Y. Duroc. A physical model of turbulent fluids. In *6th Eurographics Workshop on Animation and Simulation*, Maastricht, Netherlands, September 1995.
- [LJF⁺91] A. Luciani, S. Jimenez, J-L. Florens, C. Cadoz, and O. Raoult. Computational physics : a modeler simulator for animated physical objects. In *Eurographics '91*, Vienna, Austria, September 1991.
- [Ney97] Fabrice Neyret. Qualitative simulation of cloud formation and evolution. In D. Thalmann and M. Van de Panne, editors, *8th Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation (EGCAS'97)*, pages 113–124, New York City, NY, September 1997. Eurographics, Springer Wein.
- [Ney02] Nathalie Praizelin Fabrice Neyret. Phenomenological simulation of brooks. In *Computer Animation and Simulation '01*, pages 53–64, 2002.
- [Ney03] Fabrice Neyret. Advected textures. In *Symposium on Computer Animation*, july 2003. <http://www-imagis.imag.fr/Publications/2002/N03>.
- [NIDN97] T. Nishita, H. Iwasaki, Y. Dobashi, and E. Nakamae. A modeling and rendering method for snow by using metaballs. *Computer Graphics Forum*, 16(3) :357–364, August 1997.
- [NM02] Laurent Nack and Ludovic Maas. Kh instabilities, 2002.
<http://www.enseeiht.fr/hmf/travaux/CD0001/travaux/optmfn/gpfmho/00-01/grp5/temp.htm>.
- [PH89] Ken Perlin and Eric M. Hoffert. Hypertexture. In *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 89)*, volume 23, pages 253–262, July 1989.
- [Pow02] Powder page, 2002. <http://www.granular.com>.

- [RB85] William T. Reeves and Ricki Blau. Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle systems. In *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 85)*, volume 19, pages 313–322, July 1985.
- [Ree83] William T. Reeves. Particle systems - a technique for modeling a class of fuzzy objects. In *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 83)*, volume 17, pages 359–376, July 1983.
- [SB02] Claude Saint-Blanquet. *Mécanique des fluides*, 2002.
<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/blanquet/synophys/45meflu/45meflu.htm>.
- [Ski02] Ski planet, 2002. <http://www.ski-planet.com/infos/types-aval.php>.
- [Sta99] Jos Stam. Stable fluids. In Alyn Rockwood, editor, *Siggraph 1999, Computer Graphics Proceedings*, pages 121–128, Los Angeles, 1999. Addison Wesley Longman.
- [Sta01] Jos Stam. A simple fluid solver based on the FFT. *Journal of Graphics Tools : JGT*, 6(2) :43–52, 2001.