

# Modélisation de phénomènes naturels en synthèse d'image : l'exemple de la neige

Michel Chilowicz

## Introduction

Obtenir un rendu réaliste pour des phénomènes naturels est sans doute une des tâches des plus intéressantes mais également des plus ardues en synthèse d'image. Il s'agit alors d'élaborer des modèles offrant un compromis correct entre temps de calcul – et ce tout particulièrement en synthèse d'image temps réel – et niveau de réalisme, aussi bien dans le cadre de la réalisation d'images fixes ou d'animations. Différentes approches peuvent alors être envisagées selon la complexité des phénomènes physiques étudiés et les ressources calculatoires disponibles : des approches causales s'intéressant à l'étude des causes physiques ou biologiques à l'origine du phénomène pour en réaliser des simulations informatiques ainsi que des approches tournées vers l'analyse empirique des conséquences de ces phénomènes.

Dans le cadre de ce document, nous nous intéresserons à titre d'exemple au phénomène météorologique de chute et d'accumulation de neige. Cet exemple nous permettra d'illustrer les différentes approches qui peuvent être explorées pour résoudre un problème de modélisation de phénomène naturel. Nous nous limiterons à décrire les grands principes des techniques de modélisation envisagées sans nous attarder sur les éventuels développements calculatoires qui pourraient y être rattachés.

La formation de cristaux de neige est un phénomène particulièrement complexe : la compréhension de ce processus est encore très partielle. Nous nous intéresserons à des modèles de représentation de flocons de neige. Il est ensuite nécessaire d'étudier le mouvement de la chute d'un tel flocon et enfin son accumulation en tas sur des surfaces. Enfin nous pourrions évoquer brièvement la simulation des problèmes de stabilité du manteau neigeux pouvant entraîner des phénomènes tels que les avalanches.

## 1 Modélisation du flocon de neige

### 1.1 Forme des flocon de neige

Un flocon de neige se forme autour d'un germe (une petite particule tel qu'un grain de poussière ou une bactérie) par accumulation de cristaux de glace. Ce processus d'accumulation de cristaux est encore très mal compris ce qui nous conduit à adopter une démarche phénoménologique. Ainsi des études statistiques ont pu être réalisées sur la forme des flocons de neige : on constate alors que leur forme et surtout leur taille dépend principalement de leur température de formation[4]. Au delà d'une température de formation  $T_0$  les flocons présentent une taille constante alors qu'en dessous de cette température elle diminue<sup>1</sup>. D'autre part on constate que la densité d'un flocon est généralement inversement proportionnelle à son diamètre et dépend également du degré d'humidité de la neige étudiée.

---

<sup>1</sup>D'après les données statistiques collectées par N. Junker[4], la température charnière est  $T_0 = -0,061\text{C}$ . En dessous de cette température le diamètre  $D$  peut être ainsi exprimé (en mètres) :  $D = 0,015 \cdot |T|^{-0,35}$ . Pour  $T > T_0$ ,  $D = 0,04$ . L'incertitude sur le diamètre peut atteindre 50%.

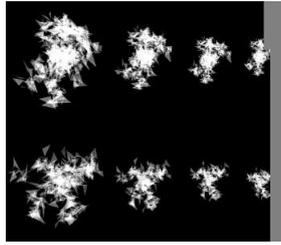


FIG. 1 – Flocons de neige vus sous deux angles différents à quatre distances différentes modélisés par Moeslund et al.[6]

## 1.2 Modélisation

### 1.2.1 Modélisation grossière

Une modélisation grossière du flocon de neige serait de le considérer comme une sphère de couleur blanche : ce modèle simple présente l'avantage d'être très rapide à implanter mais ne peut s'avérer valable que sur la visualisation de flocons de neige situés à une distance importante de la caméra. Il est nécessaire d'envisager un modèle plus précis pour l'affichage de flocons de neige à courte distance de l'objectif.

### 1.2.2 Modèle de couches concentriques de triangles

Moeslund et al. proposent un modèle empirique[6] offrant un niveau de réalisme raisonnable par l'agglomération aléatoire de triangles en couches concentriques, chaque triangle étant censé représenter un cristal. Le nombre de couches utilisées dépend directement du diamètre du flocon que l'on souhaite représenter (celui-ci dépendant de la température de formation). On contrôle également la densité du flocon de neige en ajustant le nombre de triangles qui seront utilisés pour représenter chaque couche. Il est néanmoins nécessaire, lors de l'ajout aléatoire, de bien veiller à ce que chaque triangle ajouté au flocon soit connecté à un triangle précédemment généré : pour cela, il est possible lors de la génération de chaque triangle de sélectionner aléatoirement un triangle de référence parmi la couche précédente qui possédera un sommet commun avec le triangle généré ; il reste alors à déterminer aléatoirement les deux sommets restants du triangle.

On pourra ainsi utiliser le modèle présenté pour se constituer une bibliothèque de flocons de neige précalculés variés (un millier de flocons par exemple) qui pourront ensuite être réutilisés afin de représenter les flocons tombant à une courte distance<sup>2</sup> avec une diversité acceptable.

## 2 Mouvement du flocon de neige dans l'atmosphère

### 2.1 Etude phénoménologique

En observant la chute d'un flocon de neige, on constate que celui-ci conserve globalement la trajectoire qui lui est imposée par la direction et le sens du vent. Par vent faible, on peut remarquer que le flocon se déplace selon une trajectoire qui semble être une succession de petits déplacements rectilignes (ligne brisée). Partant de ce constat, Fearing[1] propose de modéliser la chute d'un flocon<sup>3</sup> par une succession de petits segments, chacun inclus dans une sphère de rayon  $r$  donné et de vecteur directeur aléatoire suivant une loi normale. Cette méthode présente l'avantage d'être simple à implanter ; elle est cependant peu adaptée à la visualisation en temps réel de la chute d'un flocon pour laquelle une approche causale plus précise pourra être privilégiée.

<sup>2</sup>Par souci de réalisme, il faut néanmoins éviter de maintenir un flocon présentant alors des triangles de taille conséquente trop près de la caméra.

<sup>3</sup>Ou plus exactement son trajet inverse.

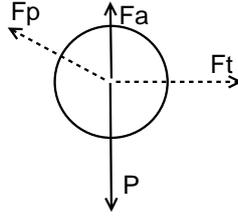


FIG. 2 – Bilan des forces s'exerçant sur le flocon de neige

## 2.2 Etude causale

Afin de simuler l'action de la gravité sur un flocon de neige, on adopte une démarche physique en réalisant un bilan des forces s'y exerçant. Outre son propre poids qui conduit à sa chute, il est nécessaire également de considérer les forces liées à la forme irrégulière du flocon de neige ainsi qu'aux turbulences de l'atmosphère (vent).

### 2.2.1 Bilan de force sur le flocon de neige

Afin d'étudier le mouvement du flocon, nous réalisons ici un bilan des forces qui s'exercent sur celui-ci. Le flocon est ainsi soumis aux forces suivantes :

- Le poids  $\vec{P} = m\vec{g}$  : il s'agit de la force créée par le champ de gravité auquel est soumis le flocon de neige. Elle est proportionnelle à la masse du flocon qui dépend elle-même de son diamètre et de sa densité.
- La poussée d'Archimède  $\vec{F}_a$  : cette force est de norme égale au poids du volume d'air déplacé par le flocon, de direction égale et de sens opposé à  $\vec{P}$ . Cependant le rapport  $\frac{\rho_{\text{air}}}{\rho_{\text{neige}}}$  ( $\rho$  étant la masse volumique) s'avérant très faible (environ 0,01), il est possible de négliger la poussée d'Archimède.
- La force de trainée  $\vec{F}_t$  : cette force créée par la présence de vent possède sa direction et est de norme proportionnelle à sa vitesse.
- La force de portance  $\vec{F}_p$  : cette force est introduite afin de modéliser les effets liés à la forme du flocon de neige. En effet, la structure irrégulière du flocon crée des turbulences atmosphériques dans son environnement immédiat. Ses turbulences sont responsables de mouvements de rotation du flocon autour de son centre de gravité ainsi que de petites translations erratiques. Cette force de portance peut être ignorée si la force de trainée est importante (lors d'un vent fort).

### 2.2.2 Etude du champ de vitesse du vent

Afin de pouvoir déterminer les forces de trainée et de portance exercées sur le flocon, il est nécessaire de déterminer le champ de vitesse du vent. Il s'agit d'un problème courant en modélisation de phénomènes naturels où il est souvent nécessaire de connaître en différents points d'une scène la direction et la vitesse des masses d'air pour étudier le mouvement de particules légères : particules de fumées, gouttelettes de brouillard, gouttes de pluie et dans le cas présent flocons de neige.

**Equation d'Euler** Afin de résoudre ce problème de mécanique des fluides, on utilise principalement les équations de Navier-Stokes. Afin de simplifier le problème, on pourra considérer que l'air forme un fluide homogène et incompressible (la masse volumique  $\mu$  de l'air est donc une constante). Par conservation de masse, nous obtenons l'équation  $\rho \cdot \nabla \cdot \vec{v} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ . En supprimant le terme diffusif de l'équation de Navier-Stokes, nous obtenons l'équation d'Euler :

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v} \right) + \text{grad} p - \rho \vec{g} = 0$$

où  $\vec{v}$  est le vecteur vitesse pour l'air recherché,  $p$  la pression atmosphérique et  $g$  l'accélération gravitationnelle. Nous ne détaillerons pas les méthodes calculatoires envisageables pour la résolution de ces équations et l'obtention du champ de vitesses : on pourra se reporter à [2].

Le champ de vitesse du vent est entièrement dépendant de la direction et de la vitesse primaire du vent ainsi que des différents obstacles de la scène : on peut ainsi noter qu'il est possible d'assurer un pré-calcul du champ ce qui est particulièrement utile pour les applications en temps réel ne présentant pas de mouvement d'obstacles importants pour le vent.

## 3 L'accumulation de neige sur des surfaces

### 3.1 Rendu du manteau neigeux par *metaballs*

En 1997, Nishita et Iwasaki proposent une méthode[8] pour assurer le rendu du manteau neigeux en utilisant des *metaballs*. Malgré le réalisme élevé atteint, le fait de considérer chaque flocon de neige comme une *metaball* nécessite des ressources de calcul très importantes dans la mesure où la surface neigeuse représentée sur une scène peut potentiellement être constituées de millions de flocons de neige indépendants. Cette méthode nécessite d'effectuer le rendu par lancer de rayons ou par la technique des *marching cubes*[5].

### 3.2 Modèle par triangulation sur matrice de hauteurs

#### 3.2.1 Matrice de hauteurs

##### Principe général

Une méthode simple pour assurer le rendu de la couverture neigeuse sur des surfaces consiste à maintenir pour chacune des surfaces potentiellement enneigeables une matrice de hauteurs de neige : chaque cellule de cette matrice correspond à la hauteur de neige enregistrée. La *densité* de la matrice de hauteurs de la surface peut être plus ou moins importante selon la précision souhaitée pour le rendu<sup>4</sup>. Le calcul des hauteurs des matrices nécessite de *lancer* des flocons de neige depuis le ciel, selon la distribution désirée<sup>5</sup> : on calcule alors la trajectoire de chaque flocon de neige pour en déduire l'éventuelle collision avec une surface de la scène. Pour chaque collision enregistrée, on incrémente la cellule de la matrice de hauteur la plus proche du lieu de collision sur la surface.

Afin d'obtenir les matrices de hauteurs pour une scène donnée, on entreprend ainsi le lancer de tous les flocons de neige de la scène. Chaque flocon de neige nécessitant un calcul individuel d'intersection de sa trajectoire avec la surface, le temps de calcul peut s'avérer prohibitif. Une heuristique possible afin d'*accélérer* l'enneigement des surfaces peut consister à échantillonner la surface du ciel et à *lancer* pour chaque petite surface du ciel un grand nombre de flocons. On calcule alors la trajectoire d'un flocon type parmi le lot de flocons lancés et on réalise une approximation consistant à disperser le lot de flocons aléatoirement à proximité du lieu de collision du flocon type.

On notera la bonne adéquation de l'usage de matrices de hauteurs pour un rendu de scène en temps réel : il est possible de pré-calculer l'enneigement initial de la scène puis de faire tomber des flocons et de mettre à jour la matrice de hauteur pour chaque collision<sup>6</sup>.

---

<sup>4</sup> Il est même possible d'envisager une augmentation *pseudo-continue* de la *densité* de la matrice avec un gradient de *densité* dirigé vers l'avant-scène, partie nécessitant le plus de détails pour le rendu

<sup>5</sup> La neige peut ainsi tomber plus abondamment depuis certaines portions du ciel que d'autres

<sup>6</sup> Cette actualisation de la matrice est réalisée sans coût supplémentaire étant donnée que la trajectoire de chaque flocon est déjà calculée.

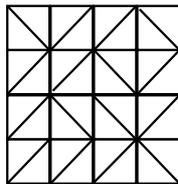


FIG. 3 – Exemple de triangulation sur une matrice de hauteurs de taille 4x4

### Cas des frontières de surface

Lorsque l'on observe des surfaces enneigées dans la nature, on constate que la couche de neige est d'épaisseur moins importante sur les frontières de la surface (ses bords). La méthode que nous avons précédemment décrite présente l'inconvénient de traiter uniformément la totalité de la matrice de hauteurs de la surface : un rendu réalisé à partir d'une telle matrice laisserait apparaître un revêtement neigeux parfaitement orthogonal à la surface sur ses bords avec un gradient d'épaisseur nul. Afin d'être plus fidèle à la réalité, on peut utiliser l'amélioration suivante : on introduit des hauteurs maximales pour chaque cellule de la matrice de hauteurs. La hauteur maximale des cellules périphériques est fixée à une valeur faible et on utilise un gradient de hauteur maximale important dirigé vers l'intérieur de la surface. Ainsi lorsque l'on s'éloigne modérément de la périphérie, la hauteur maximale atteint l'infini : aucune limitation de hauteur de neige n'est instaurée. Pour les cellules périphériques, lorsque la hauteur maximale est atteinte, au lieu d'incrémenter la cellule périphérique, on transférera transitivement le flocon, si possible, vers une surface de mêmes latitude et longitude mais d'altitude inférieure par incrémentation de la cellule de la matrice de la surface associée.

Cette problématique du rendu des frontières de surface que nous avons abordée ici sous une approche phénoménologique est en fait liée à l'instabilité de la neige. Nous traiterons de ce problème avec une approche plus causale en 4 pour généraliser des principes de simulation de ces instabilités.

#### 3.2.2 Triangulation sur la matrice de hauteurs

A partir de la matrice de hauteurs, il est nécessaire de réaliser le rendu graphique de la couche de neige. Haglund, Anderson et Hast[3] proposent de réaliser une triangulation sur cette matrice. Elle consiste à représenter les variations d'altitude relative au terrain représentées par la matrice par deux triangles pour chacune des mailles matricielles. Chaque triangle est alors défini par la position de ces trois sommets calculables par les valeurs de la matrice. Cependant, on note que pour chaque maille, il existe deux triangulations possibles : en divisant la maille par sa diagonale NO-SE ou alors par sa diagonale NE-SO. Quelle triangulation choisir ? Le choix individuel de la triangulation n'a que peu d'importance : il est nécessairement uniquement de s'assurer que les combinaisons de triangulations de mailles adjacentes ne forment pas de motif répété ce qui pourrait donner au terrain un rendu trop régulier et donc peu réaliste. Une solution qui apparaît donc satisfaisante consiste à choisir pour chaque maille une triangulation parmi les deux sur une base aléatoire (cf fig. 3).

**Transparence des triangles** Afin d'améliorer le rendu de la neige, on associe à chaque triangle composant la couverture neigeuse une valeur de transparence dépendant de la hauteur de ces sommets. La valeur de transparence peut, par exemple, être définie par une fonction affine de la hauteur de neige jusqu'à un seuil  $s$  au-delà duquel aucune transparence n'est appliquée.

### 3.2.3 Illumination de la neige

**Modèle de Phong** Afin de calculer la radiosité des triangles composant le revêtement neigeux, il est possible d'utiliser le modèle classique d'illumination de Phong. Cela nécessite de calculer les vecteurs normaux à la surface pour chaque point de la matrice afin de pouvoir réaliser l'interpolation.

**Diffusion multiple** La neige possède un albedo très élevé (supérieur à 90%) ce qui explique sa blancheur apparente (et le fort éblouissement que peut ressentir un observateur de la scène). Afin d'améliorer le réalisme du rendu, il est alors intéressant de s'intéresser à la diffusion de lumière liée au manteau neigeux. La problématique du calcul de la contribution de la diffusion est très couramment rencontrée dans l'élaboration de modèles pour les phénomènes naturels comme pour la modélisation de nuages. Dans [7], une technique de calcul d'éclairement<sup>7</sup> lié à cette diffusion est proposée par subdivision de l'espace en voxels élémentaires et résolution de système linéaire. Cette méthode coûteuse devra être délaissée pour le rendu de scènes en temps-réel où l'on peut faire l'hypothèse d'un éclairement supplémentaire constant du à la diffusion<sup>8</sup>.

## 3.3 Modélisation par fonction de prédiction d'enneigement

Ohlsson et Seipel[9] proposent une approche assurant un calcul rapide des hauteurs d'enneigement. Ils partent du principe que l'approche par matrice de hauteurs est beaucoup trop coûteuse et également assez complexe à mettre en œuvre : en effet, la création de matrice de hauteurs vierges nécessite un pré-travail de recherche d'explicitation de surfaces exposées et le calcul de trajectoires de flocons individuels soumis à différentes forces est fastidieux. Ils proposent alors d'utiliser pour déterminer la hauteur du revêtement neigeux d'une surface une fonction de prédiction d'enneigement dont le résultat est dépendant de l'inclinaison de la surface et de son exposition au ciel (un plan incliné peu exposé au ciel reçoit moins de neige par unité surfacique qu'un plan horizontal totalement exposé).

**Fonction de prédiction d'enneigement** Pour un point  $p$  d'une surface, l'expression du niveau d'enneigement  $z(p)$  est calculé par la formule suivante :

$$z(p) = f_e(p) \cdot f_{inc}(p)$$

où  $f_e$  est une fonction retournant un coefficient dans  $[0, 1]$  selon que le point de la surface est exposé ou non au ciel<sup>9</sup> et  $f_{inc}$  est une fonction d'inclinaison<sup>10</sup>.

Cette méthode de calcul de l'enneigement très empirique est facilement utilisable en application temps-réel mais elle ne prend absolument pas en compte l'action du vent : elle est ainsi totalement contre-indiquée pour la modélisation de tempêtes de neige où l'approche causale par matrice de hauteurs s'avère plus adaptée.

## 3.4 Modélisation par lancer inverse de flocons

**Principe de la méthode** Fearing[1] propose une approche originale pour la modélisation de la couverture neigeuse s'inspirant de la technique de lancer de rayons : plutôt que d'effectuer le lancer de flocons du ciel et de calculer l'intersection entre la trajectoire du flocon et la surface,

<sup>7</sup> Les auteurs proposent de calculer la diffusion multiple liée à la neige jusqu'au troisième ordre.

<sup>8</sup> Éclairement qui pourra être intégré dans la contribution à la lumière ambiante pour le modèle de Phong

<sup>9</sup> Plutôt que d'utiliser une fonction binaire, il est préférable d'utiliser une fonction retournant des valeurs continues en  $[0, 1]$  afin d'obtenir des transitions plus douces du coefficient d'exposition

<sup>10</sup> Par exemple  $f_{inc} = \cos(\theta + n)$  pour  $0 \leq \theta \leq \pi/2$  et  $f_{inc} = 0$  pour  $\theta > \pi/2$  où  $\theta$  est l'angle d'inclinaison de la normale au point  $p$  de la surface par rapport à la verticale

on réalise l'opération inverse : à partir d'une position sur la surface, on cherche à retrouver la trajectoire du flocon jusqu'au ciel. Si l'on constate que cette trajectoire intersecte un obstacle, il est alors possible d'en déduire que la portion de surface considérée ne sera pas enneigée.

**Importance des sites de lancement** Les surfaces potentiellement enneigeables sont découpées en portions selon un maillage : chaque portion forme un site de lancement pour lequel nous étudierons le lancé inverse de quelques flocons. Chaque site de lancement ne doit pas être étudié avec la même importance : ainsi un site de lancement noyé au milieu d'une surface enneigée importante requiert moins d'attention qu'un site frontière. A cet effet, il est possible de réaliser :

- Un éclatement d'un site de lancement lorsque l'on constate qu'un des sites voisins présente une occlusion différente à la neige; en effet une telle situation suggère que le site étudié joue un rôle frontière en matière d'enneigement, il est donc nécessaire d'affiner la résolution d'analyse.
- Une fusion de sites lorsque ceux-ci présentent une exposition similaire à l'enneigement, une résolution fine d'analyse n'étant pas nécessaire.

Tous les sites de lancement sont placés dans une file de priorité pour analyse future par lancer inverse de flocons, un site pouvant faire l'objet de plusieurs passes de lancer de flocons pour affiner l'analyse. La priorité d'analyse d'un site est déterminée par plusieurs facteurs dont nous exposons ici les principaux :

- Il est nécessaire de réaliser au moins une passe de lancés pour chaque site. Ainsi si un site n'a pas fait l'objet d'au moins une passe de lancés, il est prioritaire.
- Les sites de grande superficie nécessitent plus de flocons lancés, ils sont donc prioritaires par rapport aux petits sites.
- Si le gradient du pourcentage d'enneigement est important avec les sites voisins, le site est prioritaire.
- Les sites éloignés de la caméra possèdent une priorité moindre.
- En-deça d'une superficie minimum, un site de lancement n'est plus examiné : cela permet de fixer une résolution minimale pour l'étude de l'enneigement.

**Itérativité** L'intérêt de cette méthode réside dans son itérativité : il est en effet possible potentiellement (si l'on ne définit pas de résolution minimale d'analyse) de réaliser un nombre infini de passes d'analyse en utilisant la file de priorité de sites. La précision de l'enneigement calculé pour la scène dépend directement du temps alloué pour son exécution : au-delà de l'étude du maillage initial de sites, celui-ci peut être arrêté à tout moment.

**Normalisation** Lorsque l'on réalise le lancement des flocons, on détermine si ceux-ci peuvent atteindre le ciel ou sont arrêtés par un obstacle. Afin de déterminer la masse de neige que reçoit chaque portion de surface, assurer le suivi des flocons sur le ciel est indispensable. A cet effet, on réalise un maillage du ciel et on maintient une matrice dont chaque cellule représente la masse de neige  $m_c$  reçue par lancé inverse de flocons. On fixe ensuite une distribution de neige pour le ciel : à titre de simplification, on peut la considérer comme uniforme (chaque maille du ciel émet une masse égale de neige  $m$ ). On assigne alors à chaque flocon d'une maille une masse  $m/m_c$ . La hauteur de neige d'un site de lancement est alors proportionnelle à la somme des masses attribuées à chaque flocon lancé.

## 4 Les instabilités du manteau neigeux

### 4.1 Stabilité de la neige

Précédemment, nous avons toujours fait implicitement l'hypothèse simplificatrice de la stabilité du manteau neigeux. Cependant, dans la réalité, la neige accumulée sur une surface peut être soulevée et déplacée par le vent voire participer à la formation d'une avalanche dans le cas de terrains

pentus. Afin d'augmenter le réalisme du rendu de scènes de terrains enneigés il est nécessaire de prendre en compte ce facteur d'instabilité.

**Angle de repos** Fearing[1] propose une méthode afin de traiter le problème de la stabilité de la neige. Elle est basée sur la calcul de l'angle de repos<sup>11</sup> du type de neige<sup>12</sup> étudié. Afin de calculer l'angle de repos entre un site de surface<sup>13</sup> et un de ses voisins, on utilise la hauteur de neige accumulée relative entre les deux sites de surface. On utilise alors un modèle décrivant la probabilité de la stabilité autour de la valeur d'angle de repos pour déterminer s'il est nécessaire de transférer une portion de neige d'un site de surface à un autre.

**Algorithme de résolution de stabilité** Nous décrivons ici brièvement les différentes étapes de l'algorithme de résolution de stabilité de Fearing[1].

1. On calcule l'angle de repos  $AOR(s, n_i)$  entre un site de surface  $s$  et tous ses voisins  $n_i$  possédant une altitude inférieure à  $s$ . Ces sites  $n_i$  sont candidats à recevoir des flocons de  $s$ .
2. Pour chaque site  $n_i$  tel que  $AOR(s, n_i)$  est supérieur à l'angle de repos théorique, on réalise un test d'obstacles entre  $s$  et  $n_i$ . S'il existe un obstacle non-neigeux,  $n_i$  n'est plus candidat à la réception de neige ; s'il existe une surface neigeuse verticale qui fait obstacle, l'avalanche est également bloquée. Si par contre une surface neigeuse non-verticale est rencontrée, celle-ci est candidate à la réception de neige de  $s$  et vient remplacer  $n_i$ .
3. On transfère de la neige de  $s$  vers tous ses voisins  $n_i$  jusqu'à obtenir au moins un site voisin stable.
4. On répète les étapes 1 et 3 jusqu'à transférer toute la neige de  $s$  ou jusqu'à obtenir tous les voisins stables.

Il est nécessaire d'étudier tous les sites de surfaces avec cet algorithme dans l'ordre inverse de leur altitude (somme de l'altitude de la surface et de la hauteur de la couche actuelle de neige). Lors du traitement des sites de la liste, on crée une seconde liste qui reçoit les sites affectés par les changements liés au traitement (sites voisins, sites de stabilité modifiée). Cette seconde liste est ensuite examinée en utilisant l'algorithme décrit pour chacun des sites, toujours dans l'ordre d'altitude inverse : une troisième liste est créée pour référencer les sites affectés. L'opération peut ainsi être renouvelée indéfiniment. En pratique, on peut arrêter le processus lorsque la stabilité des sites est jugée satisfaisante (le transfert de neige est faible lors du parcours de la liste) ou lorsque un quota temporel est dépassé.

## 4.2 Modélisation de traces dans la neige

Nous nous sommes principalement intéressé, au cours du développement de cet exemple, à la modélisation de *natures mortes* soumises à l'action de la neige. La présence d'objet ou d'êtres vivants en mouvement dans une scène enneigée nécessite ensuite d'envisager la modélisation de traces. Nous ne nous détaillerons pas les différentes solutions qui peuvent être déployées pour répondre à cet problème ; on pourra se reporter à cet effet notamment à la méthode d'animation de boue, sable et neige présentés par Summer et al.[10].

## Conclusion

Comme nous avons pu le constater au cours du développement de cet exemple, la compréhension d'un phénomène physique tel que la formation, le mouvement et l'accumulation de la neige

---

<sup>11</sup>L'angle de repos est une propriété physique des matériaux particuliers : il s'agit de l'angle formé par un tas de ce matériau entre la pente de ce tas et l'horizontale. Il est dépendant du coefficient de friction statique du matériau.

<sup>12</sup>L'angle de repos peut varier de  $90^\circ$  pour de la neige fraîche à  $15^\circ$  pour de la neige fondue. Le cas extrême d'angle de repos de  $0^\circ$  peut être observé pour de l'eau liquide.

<sup>13</sup>Appelé site de lancement en suivant la terminologie utilisée pour la méthode d'enneigement par lancer inverse de flocon décrite en 3.4.

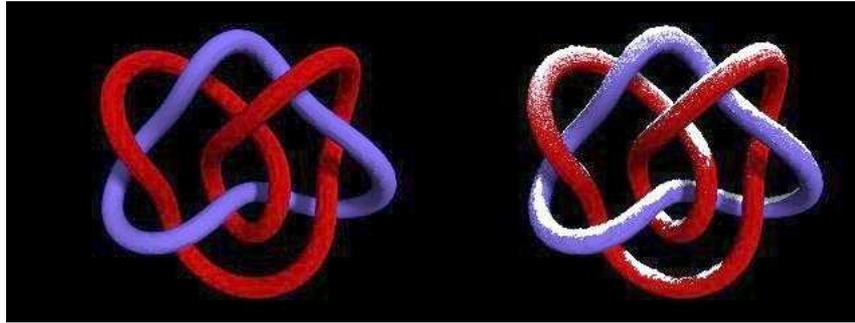


FIG. 4 – Un exemple d’enneigement d’un nœud utilisant la méthode de résolution d’instabilités de Fearing[1]

est particulièrement complexe : nous devons généralement nous contenter d’exploiter des modèles physiques empiriques élaborés à partir d’observations. Cette remarque est également valable pour la plupart des phénomènes naturels qui ne sont pas moins complexes que l’étude de la neige : formation de brouillard, de pluie, mouvements de cours d’eau, de cascades sont autant de manifestations naturelles qui font aujourd’hui l’objet de recherches actives afin d’obtenir des modèles plus réalistes et moins coûteux en espace mémoire et temps de calcul.

## Références

- [1] P. Fearing. Computer modelling of fallen snow. In *SIGGRAPH’2000*, pages 37–46, 2000.
- [2] R. Fedkiw, J. Stam, and H. Jensen. Visual simulation of smoke. In *SIGGRAPH’2001*, 2001.
- [3] H. Haglund, M. Anderson, and A. Hast. Snow accumulation in real-time. In *SIGRAD*, pages 11–15, 2002.
- [4] N. Junker. Winter weather forecasting. 2000.
- [5] William E. Lorensen and Harvey E. Cline. Marching cubes : A high resolution 3d surface construction algorithm. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 21(4) :163–169, 1987.
- [6] T.B. Moeslund, C.B. Madsen, M. Aagaard, and D. Lerche. Modeling falling and accumulating snow. In *Second International Conference on Vision, Video And Graphics*, Heriot Watt University, Edinburgh, Scotland, 2005.
- [7] T. Nishita, Y. Dobashi, and E. Nakamae. Display method of cloud taking into account multiple anisotropic scattering and sky light. In *SIGGRAPH’96*, pages 379–386, 1996.
- [8] T. Nishita, H. Iwasaki, Y. Dobashi, and E. Nakamae. A modeling and rendering method for snow by using metaballs. *Eurographics ’97*, 16, 1997.
- [9] P. Ohlsson and F. Seipel. Real-time rendering of accumulated snow. Master’s thesis, Uppsala University, 2003.
- [10] R.W. Summer, J.F. O’Brien, and J.K. Hodgins. Animating sand, mud, and snow. *Computer Graphics Forum*, 18, 1999.