

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE  
CONCENTRATION TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION  
M.Ing.

PAR  
Jonathan GAGNON

MODÉLISATION PROCÉDURALE DE STALACTITES DE GLACE

MONTRÉAL, LE 26 MAI 2011

© Tous droits réservés, Jonathan Gagnon, 2011

© Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Eric Paquette, directeur de mémoire  
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

M. Richard Lepage, président du jury  
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Luc Duong, membre du jury  
Département de génie logiciel et des TI à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 03 MAI 2011

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

## **REMERCIEMENTS**

Nous remercions le Biological Modeling and Visualization research group, Przemek Prusinkiewicz et Steve Longay pour nous avoir fourni plusieurs modèles d'arbre qui ont servi à la validation de notre algorithme. Nous remercions les artistes de Mokko Studio pour leurs commentaires constructifs tout au long du développement. Nous remercions Nicolas Rous et François Dagenais de l'équipe du laboratoire de recherche chez Mokko Studio pour les discussions et les suggestions. Nous remercions Danny Bergeron, président de Mokko Studio, pour nous avoir permis de réaliser ce projet.

# **MODÉLISATION PROCÉDURALE DE STALACTITES DE GLACE**

Jonathan GAGNON

## **RÉSUMÉ**

La formation de stalactite de glace est un phénomène complexe, ce qui rend difficile sa modélisation en image de synthèse. Les algorithmes couramment utilisés en infographie utilisent une approche basée uniquement sur des simulations physiques et qui demande plusieurs minutes, voire quelques heures de calcul. Ce mémoire propose une technique procédurale permettant une modélisation interactive. La modélisation est séparée en quatre étapes. La première calcule le mouvement de l'eau sur une surface ; la deuxième détermine où les gouttes d'eau chutent; la troisième calcule les trajectoires des stalactites ; la dernière construit la surface. De plus, une méthode permettant de créer du verglas est combinée à l'étape de modélisation. Les résultats obtenus sont non seulement réalistes mais aussi rapides à calculer. C'est la première approche permettant de créer ce type de glace sur des surfaces complexes et de façon interactive.

**Mots-clés :** Phénomène naturel, modélisation procédurale, stalactite de glace, verglas

# MODÉLISATION PROCÉDURALE DE STALACTITES DE GLACE

Jonathan GAGNON

## ABSTRACT

Icicles formation is a complex phenomenon which makes it difficult to model for computer graphics applications. The methods commonly used in computer graphics to model icicles provide only minimal control over the results and require several minutes or even hours of computation. This paper proposes a procedural approach allowing interactive modeling, which is broken down into four stages. The first computes the water motion on the surface ; the second determines where the water drips ; the third computes the trajectories of the icicles growth, and the fourth creates the surface. In addition, the approach allows the creation of glaze ice. The results are not only realistic but also rapidly computed. This approach provides a significant increase in control over results and computation speed.

**Keywords:** Natural phenomena, Procedural modeling, Icicle, Ice modeling, Glaze ice

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'ART.....	3
1.1 Givre.....	3
1.2 Verglas.....	3
1.3 Stalactites de glace.....	5
1.4 Contributions.....	6
CHAPITRE 2 DÉFINITION DE LA STALACTITE DE GLACE.....	8
CHAPITRE 3 MODÉLISATION PROCÉDURALE DE STALACTITES DE GLACE..	10
3.1 Calcul des coefficients d'eau.....	10
3.2 Point de chute.....	15
3.3 Définir la trajectoire des stalactites de glace.....	18
3.3.1 Gestion de la collision de la trajectoire.....	25
3.4 Créer la surface des stalactites.....	25
3.4.1 Profil.....	26
3.4.2 Modélisation.....	27
3.4.3 Base de la stalactite.....	29
3.4.4 Verglas.....	31
CHAPITRE 4 RÉSULTATS.....	33
CHAPITRE 5 LIMITATIONS.....	43
CHAPITRE 6 TRAVAUX FUTURS.....	44
CONCLUSION.....	45
ANNEXE I METABALL.....	47
ANNEXE II L-SYSTEM.....	49
LISTE DE REFERENCES.....	53

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Utilisation de l’algorithme DLA pour la création de givre. Image produite chez Mokko Studio. .... 4
Figure 2.1	Stalactite de glace coupée en deux. .... 8
Figure 3.1	Étapes de la modélisation interactive des stalactites de glace..... 11
Figure 3.2	Approvisionnement d’eau sur une théière. .... 12
Figure 3.3	Coefficients d’eau sur différentes surfaces. .... 15
Figure 3.4	Critère de chute..... 16
Figure 3.5	Région de chute. .... 17
Figure 3.6	Point de chute. .... 17
Figure 3.7	Photographie de stalactites rectilignes. .... 19
Figure 3.8	Photographie d’une stalactite courbée. .... 20
Figure 3.9	Photographie de stalactites qui fusionnent et qui se divisent..... 21
Figure 3.10	Illustration des règles du L-System. .... 22
Figure 3.11	Exemples de dispersion de branches de stalactites. .... 23
Figure 3.12	Exemples de trajectoires avec différents angles de départ. .... 23
Figure 3.13	Trajectoires courbées..... 24
Figure 3.14	Plusieurs possibilités de trajectoires..... 24
Figure 3.15	Résultat d’une trajectoire modifiée par des collisions. .... 25
Figure 3.16	Photographie d’une stalactite de glace possédant une surface ondulée. .... 27
Figure 3.17	Contrôle de la surface de la stalactite de glace..... 28



Figure 3.18	Comparaison d'une modélisation (droite) avec une vraie stalactite de glace (gauche). . . . .	29
Figure 3.19	Photographie de plusieurs stalactites ainsi que leur base. . . . .	30
Figure 3.20	Bases de stalactites sur différentes surfaces courbées. . . . .	31
Figure 3.21	Différents types de verglas. . . . .	32
Figure 3.22	Rendu de différents types de verglas. . . . .	32
Figure 4.1	Stalactites de glace sur une théière. . . . .	35
Figure 4.2	Stalactites de glace sur une fontaine. . . . .	36
Figure 4.3	Stalactites de glace sur le Happy Buddha de Stanford. . . . .	37
Figure 4.4	Stalactites de glace sur le bunny de Stanford. . . . .	38
Figure 4.5	Stalactites de glace sur l'armadillo de Stanford. . . . .	39
Figure 4.6	Stalactites de glace sur le dragon de Stanford. . . . .	40
Figure 4.7	Stalactites de glace sur un arbre. . . . .	41
Figure 4.8	Zoom sur des stalactites de glace sur les branches d'un arbre. . . . .	42
Figure I.1	Différentes interactions entre deux metaballs . . . . .	48
Figure II.1	Courbe de Koch. . . . .	52
Figure II.2	Utilisation de l'angle d'or. . . . .	53

## INTRODUCTION

### Contexte

Au cinéma, comme dans les jeux vidéo, la modélisation de phénomènes naturels est de plus en plus recherchée. En effet, lors de tournages, la température est hors de contrôle et les échéanciers souvent peu flexibles. Il est donc possible que dans le scénario il doive pleuvoir et qu'il fasse beau lors du tournage, la pluie doit alors être ajoutée en post-production. Il existe toutefois des méthodes pour ajouter de la fausse pluie lors d'un tournage. Par contre, lorsqu'il s'agit de phénomènes plus complexes comme des inondations, des tremblements de terre ou encore des coulées de lave, il est beaucoup plus difficile des les imiter en production ou même en post-production.

Ces dernières années, beaucoup de ces phénomènes, longtemps impossibles à recréer de façon réaliste à l'écran, ont été matérialisés numériquement. Il a été possible de les voir notamment en 2004 dans le film « The day after tomorrow » ou encore plus récemment en 2009 dans le film « 2012 ».

Lorsqu'il s'agit de phénomènes météorologiques complexes, il est nécessaire de posséder une compréhension du phénomène physique et l'utilisation d'un simulateur, ce qui ne vient pas sans problème.

### Problématique et hypothèse

La matière existe sous différentes phases, en particulier liquide, solide et gazeuse. La dynamique d'un état particulier peut dépendre fortement de son état précédent. Par exemple, la forme de la glace créée par solidification dépend de la dynamique de l'eau juste avant le changement de phase. Les règles définissant sa création sont donc basées sur la mécanique des fluides et la thermodynamique. Il serait ainsi possible, avec une simulation physique, d'avoir de la glace d'apparence réaliste.

L'utilisation de simulation physique pour générer de la glace nécessite souvent un temps de calcul très long (Kim *et al.*, 2006) ce qui laisse peu de place à l'interactivité. De plus, la manipulation de plusieurs paramètres qui ne sont pas intuitifs est nécessaire. Lorsqu'un résultat particulier est recherché par exemple, il faut tester plusieurs combinaisons, ce qui s'avère ardu et fastidieux. Ce sont ces problèmes qui sont au coeur de ce projet de recherche.

La problématique de ce mémoire est donc posée comme suit : comment peut-on procurer à l'utilisateur une méthode lui permettant de créer des stalactites de glace visuellement réalistes de façon intuitive et qui laisse place à la créativité ?

L'hypothèse de ce mémoire est par conséquent la suivante : afin de modéliser du verglas et des stalactites de glace sur des agencements géométriques complexes, un modèle procédural de glace en plusieurs étapes interactives peut être créé. Il est à noter que ce projet de recherche portent sur la modélisation géométrique de la stalactite et ne traite pas du rendu graphique.

## **Organisation**

L'organisation de ce mémoire va comme suit. Le chapitre 1 présentera un survol de l'état de l'art. Le chapitre 2 présentera une définition de la stalactite de glace. Le chapitre 3 présentera la méthodologie proposée dans ce mémoire. Le chapitre 4 fera état des résultats de la méthodologie. Au chapitre 5, les limitations y seront expliquées. Au chapitre 6, les travaux futurs seront discutés. Finalement, dans la conclusion, les contributions de ce travail seront résumées.

## CHAPITRE 1

### ÉTAT DE L'ART

Dans ce chapitre, l'état de l'art sur la modélisation de la glace en infographie sera présenté. Le chapitre contient trois sections. Chacune des sections représente un type de glace qui a été étudié en infographie. Ainsi, la première section porte sur la modélisation de givre, la deuxième section porte sur le verglas et la troisième section porte sur les stalactites de glace. Dans la section sur les stalactites de glace, un survol de l'état de l'art concernant le phénomène physique est introduit afin de bien comprendre la complexité du phénomène à reproduire en infographie.

#### 1.1 Givre

Le givre se crée lorsque l'eau est sous forme de microgouttelettes. Les champs de phase (*phase field*) ont été utilisés afin de calculer ce type de solidification par Kim *et al.* (2003). Cette approche donne aussi un certain contrôle à l'utilisateur en permettant la spécification d'une image source qui affectera l'allure du givre. Dans le but d'augmenter le réalisme, un algorithme hybride a été créé combinant champs de phase, agrégation par diffusion limitée (*Diffusion-limited aggregation*, illustrée sur la figure 1.1) et simulation de fluide (Kim *et al.*, 2004a).

Ces méthodes donnent des résultats plausibles pour la création de givre. Toutefois, comme elles ne gèrent que les couches très minces de glace, il est impossible de créer d'autres formes telles que du verglas d'une épaisseur suffisante, ou encore des stalactites. Ces techniques traitent des cristaux tandis que le verglas et les stalactites de glace sont des phénomènes différents.

#### 1.2 Verglas

Le verglas se crée lorsque l'eau est sous forme de goutte. Les surfaces implicites ont été utilisées afin de modéliser des gouttes d'eau statiques sur une surface (Yu *et al.*, 1999). L'une des contraintes de cette modélisation est la perte de volume. Il est possible d'ajouter la conser-

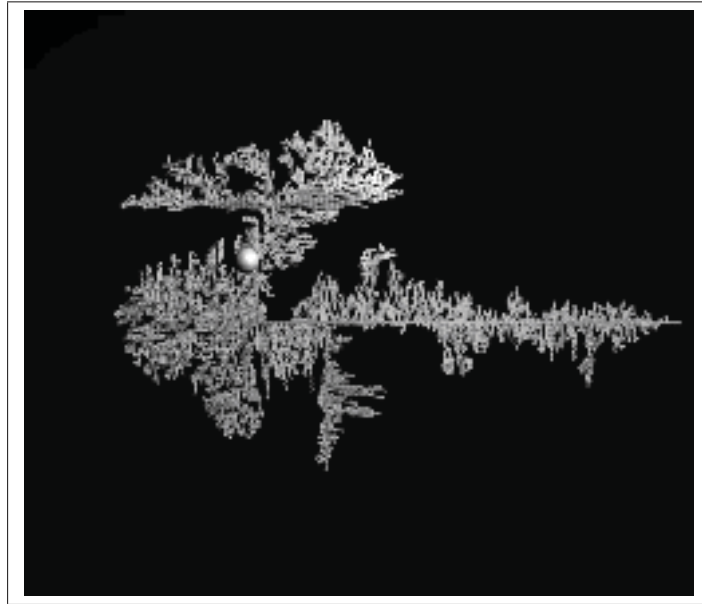


Figure 1.1 Utilisation de l'algorithme DLA pour la création de givre.  
Image produite chez Mokko Studio.

vation du volume à l'utilisation de surface implicite (Tong *et al.*, 2002). Par contre, le résultat manque de réalisme puisque l'eau semble très visqueuse. Un système de ressort a été utilisé par Fournier *et al.* (1998) pour la modélisation des gouttes d'eau qui procure un résultat plus réaliste. La technique proposée permet de séparer la modélisation de la goutte et son mouvement sur le maillage. En effet, afin de simuler le mouvement de la goutte d'eau, une simulation de particules est utilisée indépendamment de la forme de la goutte. Toutefois, cette méthode ne gère pas la fusion ou la séparation des gouttes d'eau. Pour régler ce problème, Wang *et al.* (2005) proposent une méthode dynamique physiquement correcte. Celle-ci tient compte de l'angle de contact à l'intersection entre le liquide et la surface. De plus, elle gère les surfaces qui sont courbées et procure un résultat très réaliste. Cette méthode est très précise mais elle prend toutefois près d'une semaine de calcul par simulation.

Grâce à ces méthodes, il est possible de calculer le parcours d'une goutte d'eau sur une surface jusqu'à son point de chute. Cependant, ces méthodes sont plus précises que ce qui est nécessaire pour la création de stalactites et elles ne permettent pas de calculs en temps interactif.

### 1.3 Stalactites de glace

Ce qui caractérise la stalactite de glace, c'est la solidification de gouttes d'eau qui parcourent la surface jusqu'à un point de chute. Pour bien comprendre ce qu'implique la création d'une approche qui traite ce type de phénomène, les modèles théoriques qui existent en glaciologie sont d'abord présentés. Il existe plusieurs modèles pour la croissance de stalactite de glace. Makkonen (1988) propose un modèle de croissance prenant en compte la croissance horizontale vers l'extérieur, horizontale vers l'intérieur et verticale en direction de la pointe. La convection et la conduction sont prises en compte notamment pour expliquer le gel de la colonne d'eau à l'intérieur de la stalactite. Maneo *et al.* (1994) proposent un modèle incluant la croissance dendritique à l'extrémité de la stalactite et sur ses côtés en calculant le transfert de chaleur des couches turbulentes autour de la stalactite. Le modèle de Szilder et Lozowski (1994) permet de prédire en fonction du temps, la forme, la taille, la fréquence de chute des gouttes d'eau ainsi que la masse de la stalactite.

Ces modèles sont basés essentiellement sur l'observation empirique faite par les auteurs. Ils ne fournissent pas de méthodes pour simuler la croissance des stalactites. Toutefois, ils procurent un ensemble complet de règles permettant de comprendre la mécanique de la stalactite. L'approche proposée dans ce travail s'inspire donc de ces règles pour créer un modèle en infographie qui permet de créer des stalactites. Il suit les observations empiriques de la croissance de la stalactite en donnant des résultats plausibles sans calculer la dynamique de chaque goutte d'eau.

La stalactite de glace fut étudiée en infographie par Kharitonsky et Gonczarowski (1993). Ils proposent un modèle de glace basé sur la thermodynamique utilisant une simulation discrète. Ce modèle inclut la tension superficielle, la tendance des gouttes d'eau à suivre un emplacement déjà mouillé, l'angle de contact, le transfert de chaleur ainsi que la conductivité. Quoique le résultat soit réaliste, cette méthode ne peut simuler plusieurs stalactites à la fois. De plus, le calcul ne se fait que sur la stalactite elle-même. Par conséquent, il faut placer à la main le résultat de la simulation sur la surface des objets. Kim *et al.* (2006) se sont attaqués par la suite

à la formation de stalactites de glace en proposant une simulation basée sur « le problème de Stefan » (*Stefan problem*) qui permet de simuler plusieurs stalactites. Bien que les résultats de ce travail soient réalistes, ils nécessitent beaucoup de calcul. Il est mentionné qu'une simulation prend entre 5 et 30 minutes. De plus, les surfaces sur lesquelles sont simulés les glaçons sont simples et l'utilisateur n'a pas de contrôle sur le positionnement des stalactites.

#### 1.4 Contributions

L'approche proposée permet de réduire considérablement le problème des temps de calcul. En effet, au lieu de passer par une simulation physique comme c'est le cas pour Kharitonsky et Gonczarowski (1993) et Kim *et al.* (2006), le modèle de calcul est procédural. L'approche calcule automatiquement la distribution d'eau sur la surface. Il est ainsi possible de positionner les points où l'eau se détache de la surface ce qui était impossible avec les techniques précédentes.

L'approche procédurale, contrairement à la simulation physique, permet de répondre à l'objectif de l'interactivité avec l'utilisateur. De plus, l'approche permet de traiter des objets aux surfaces complexes, tels que des arbres.

Les travaux antérieurs ne permettent pas de contrôler la forme des stalactites. Il est donc impossible de définir trivialement une taille maximale ou de changer le type de croissance de la stalactite. Par conséquent, l'approche proposée utilise une grammaire formelle permettant de générer et de contrôler la croissance de la stalactite.

La modélisation des stalactites de l'approche proposée se fait grâce à l'utilisation de surface implicite comme dans les travaux de Yu *et al.* (1999) et de Tong *et al.* (2002) permettant ainsi une apparence réaliste de la surface.

En résumé, nos contributions les plus importantes sont :

- Une réorganisation de la simulation en étapes permettant l'intervention de l'utilisateur et un calcul rapide.
- Un modèle procédural de formation de stalactite de glace et de verglas.

- Un calcul efficace de coefficient d'eau sur une surface.
- Un placement automatique des chutes de gouttes d'eau pour la formation des stalactites de glace.
- Une grammaire formelle permettant de générer différents types de croissance de stalactites de glace.
- Une gestion de la collision de stalactites de glace.
- L'interactivité sur la modélisation et les trajectoires des stalactites de glace.



## CHAPITRE 2

### DÉFINITION DE LA STALACTITE DE GLACE

Cette section décrit le processus général de formation des stalactites de glace. Elle met en évidence le mécanisme de création et de croissance de la stalactite. Par définition, une stalactite se crée lorsqu'un flot d'eau (ou un autre liquide) coule à la surface d'un objet et se trouve dans une configuration où il pourrait tomber. Au moment de la chute, si les conditions le permettent, l'eau encore en contact avec la surface peut se solidifier (Kharitonsky et Gonczarowski, 1993).

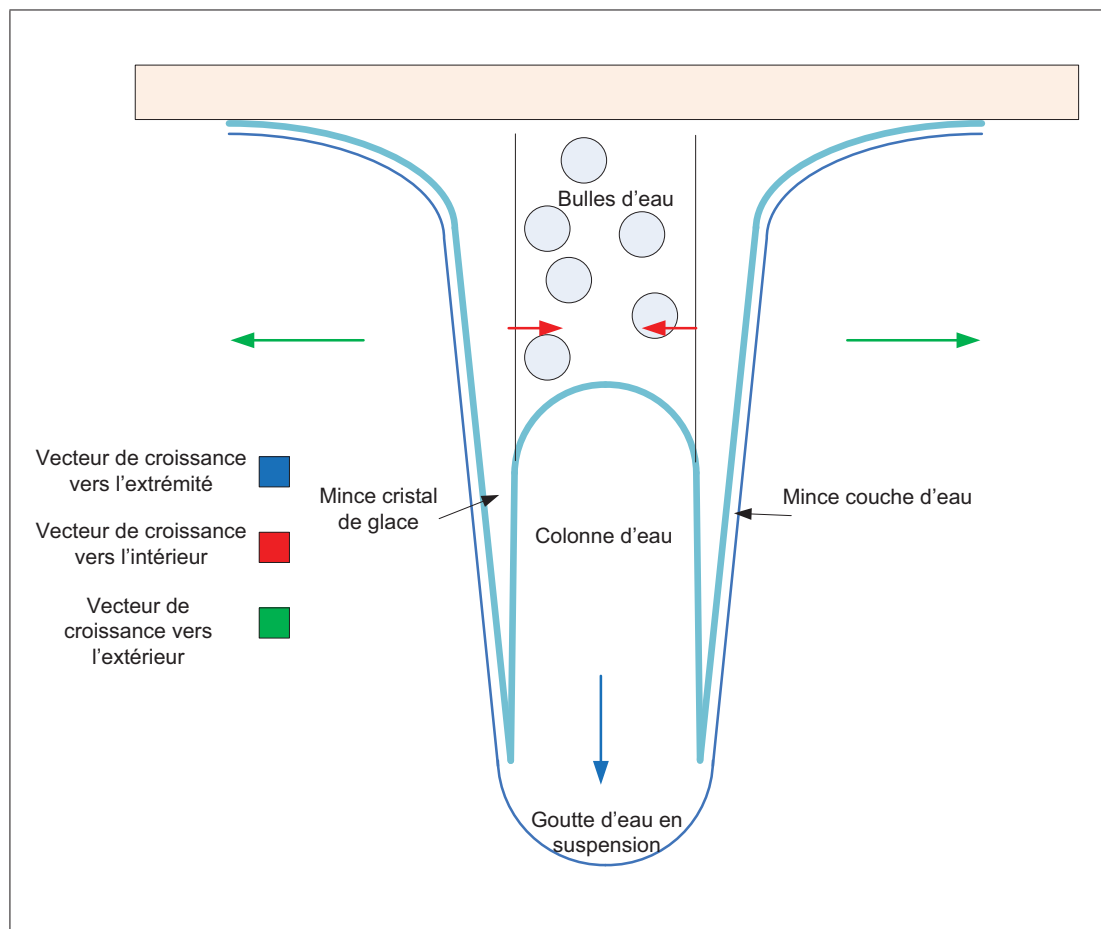


Figure 2.1 Stalactite de glace coupée en deux.

Une stalactite croît en augmentant sa longueur et son diamètre selon Maneo *et al.* (1994). Lorsque l'eau qui coule à la surface de la glace laisse une trace mouillée et que celle-ci gèle, cela crée une couche qui affecte le diamètre de la stalactite (Kharitonsky et Gonczarowski, 1993). Cette mince couche d'eau recouvre de façon uniforme la surface de la stalactite à moins que la quantité d'eau soit très faible (Kharitonsky et Gonczarowski, 1993). Si la quantité d'eau est assez importante, l'eau se rend jusqu'à la pointe. C'est seulement à ce moment que la stalactite peu croître en longueur.

À l'extrémité de la stalactite se trouve une goutte d'eau en suspension. Celle-ci grossit jusqu'à atteindre une certaine taille avant de tomber. La forme de cette goutte peut être approximée par un hémisphère (Makkonen, 1988).

Comme illustré sur la figure 2.1, qui s'inspire de la figure 1 de l'article de Makkonen (1988), il y a trois vecteurs de croissance : croissance horizontale vers l'extérieure, croissance horizontale vers l'intérieure et croissance verticale. Ce sont essentiellement le vecteur de croissance horizontale vers l'extérieure et le vecteur de croissance verticale qui seront utilisés dans la méthode proposée.

Au centre de la stalactite de glace se trouve une colonne d'eau et des bulles d'eau prisonnières. Toutefois, puisque ce sont des détails qui ne sont pas forcément visibles lors du rendu, ils ne sont pas traités dans ce travail. De plus, les bulles d'eau peuvent être facilement ajoutées par l'utilisateur après le processus de modélisation.

## CHAPITRE 3

### MODÉLISATION PROCÉDURALE DE STALACTITES DE GLACE

Le principe de la méthode proposée est de décomposer la création de glace en quatre étapes. Cette décomposition permet à l'artiste d'intervenir sur le résultat entre les étapes et amène donc un contrôle accru sur les résultats. De plus, la décomposition proposée permet un calcul très rapide assurant à l'artiste un contrôle interactif. Qui plus est, l'intervention de l'utilisateur n'est pas nécessaire pour avoir un résultat réaliste : la méthode permet de calculer ce qui est le plus plausible en fonction de la surface d'entrée.

La première étape consiste à calculer le parcours de l'eau sur une surface définie par un maillage de polygones. Le résultat est un maillage avec une valeur sur chaque sommet représentant le coefficient d'eau. La deuxième étape permet de définir l'endroit où se forme la stalactite. Puisqu'elle se forme où les gouttes d'eau chutent, une approche permettant de calculer les points de chute a été créée. La troisième étape calcule les trajectoires des stalactites à partir des points de chute en fonction de leur coefficient d'eau. Chaque trajectoire possède comme information le coefficient d'eau qui définit le taux de croissance. La quatrième étape modélise la surface des stalactites en fonction de leurs trajectoires. Différents paramètres, comme le rayon et le taux de croissance, sont fournis afin d'ajuster le résultat final. De plus, entre chacune de ces étapes, comme illustré sur la figure 3.1, l'utilisateur peut intervenir et ajuster le résultat. Par exemple, après les calculs des coefficients d'eau, l'utilisateur peut les repeindre. Les points de chute peuvent être déplacés et les trajectoires peuvent être éditées. Finalement, le maillage final peut être retravaillé.

#### 3.1 Calcul des coefficients d'eau

Le calcul du parcours de l'eau sur la surface est la première étape de l'approche proposée. Le but de cette étape est de déterminer, pour chacun des sommets de la surface, si l'eau s'y écoule et quelle est la quantité d'eau approximative. Les sommets où l'eau peut s'écouler seront

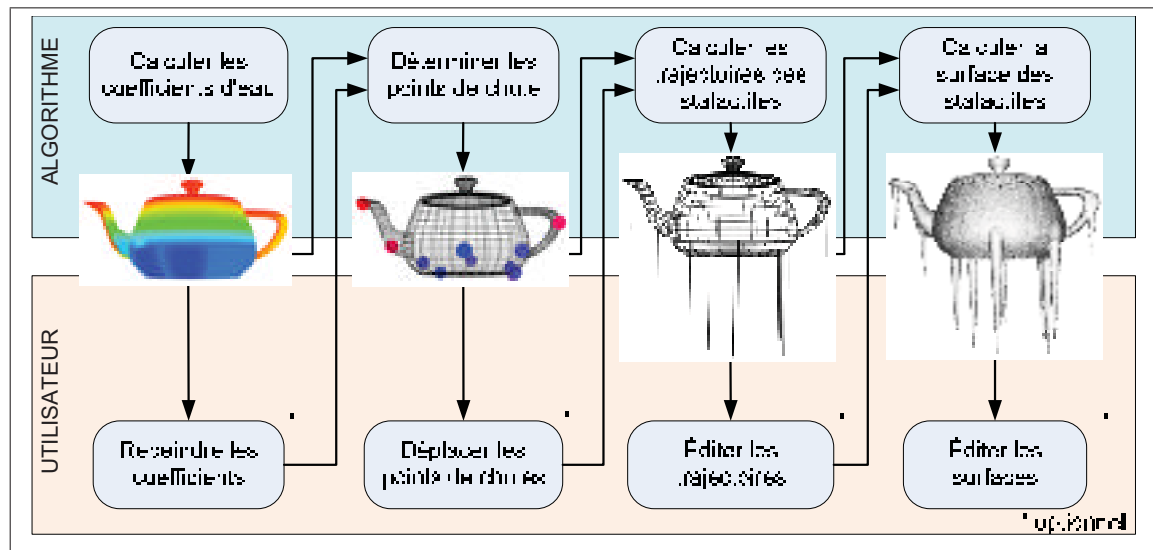


Figure 3.1 Étapes de la modélisation interactive des stalactites de glace.

utilisés pour déterminer les régions où les stalactites peuvent se former. La quantité d'eau approximative servira à déterminer le taux de croissance de la stalactite.

La répartition de l'eau se base sur deux éléments : l'eau atteint la surface afin de créer un approvisionnement d'eau et l'eau parcourt la surface jusqu'à ce qu'elle s'immobilise ou tombe de la surface. Lorsqu'il s'agit de la formation des stalactites, une des sources d'eau principales est la pluie (Makkonen, 1988). Dans notre implémentation, l'origine de la pluie provient d'une *surface source*  $ss$  spécifiée par l'utilisateur. Les gouttes de pluie sont calculées grâce à un lancer de rayon en provenance de  $ss$  en fonction du vecteur de gravité. L'origine des rayons est distribuée aléatoirement sur  $ss$  en fonction du nombre de rayon défini par l'utilisateur. Chacun des sommets se trouvant dans un rayon d'influence  $rii$  autour du point d'intersection, sera considéré comme faisant partie de l'approvisionnement. Afin de visualiser le résultat, la couleur des sommets est rouge pour ceux faisant partie de l'approvisionnement et blanche pour les autres. À la figure 3.2, la couleur des polygones représente l'interpolation de la couleur des sommets.

Avec un approvisionnement d'eau défini, le parcours de la surface peut être effectué afin de calculer les *coefficients d'eau*. Pour effectuer ces calculs, il serait possible d'utiliser une simu-

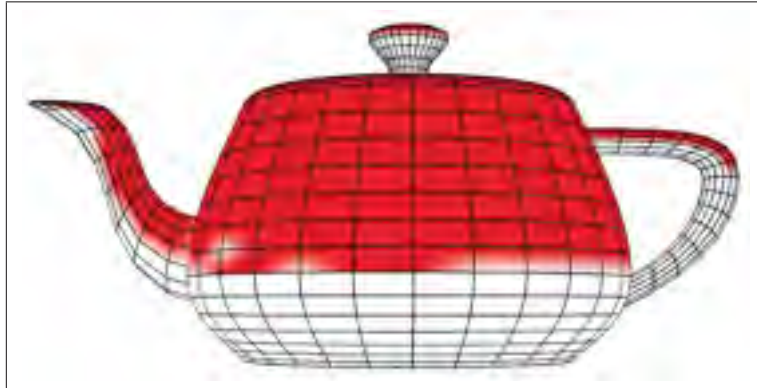


Figure 3.2 Approvisionnement d'eau sur une théière.

lation de particules comme pour les approches de Dorsey *et al.* (1996) et de Fournier *et al.* (1998) qui permettrait d'avoir le détail de chaque goutte d'eau sur la surface. Dans l'approche proposée, l'eau est plutôt propagée de sommet en sommet le long des arêtes du maillage. Cette méthode est suffisamment précise pour par la suite construire des glaçons et elle a l'avantage de proposer une simulation de l'écoulement beaucoup plus rapide à calculer.

Les coefficients d'eau peuvent être calculés en imitant la nature : à partir des sommets de l'approvisionnement, suivre la surface en direction de la gravité jusqu'à trouver un point de chute. On appelle cette approche *vers le bas*. Puisque le parcours se fait de sommet en sommet en utilisant les arêtes, si toutes les gouttes d'eau suivent l'arête la plus basse, il se peut que des régions restent complètement sèches. Pour éviter ce problème, les gouttes d'eau devraient être séparées sur plusieurs arêtes, ce qui augmenterait grandement le temps de calcul. De plus, afin de calculer le verglas, la quantité d'eau qui circule sur chaque sommet doit être connue. Ainsi, chaque goutte d'eau simulée doit ajuster le coefficient d'eau sur chaque sommet rencontré. Il en résulte plusieurs écritures mémoire, ce qui réduit l'efficacité de l'approche, en particulier pour une implémentation en parallèle.

À cause de ces problèmes, une autre approche est proposée dans ce travail : une approche *vers le haut*. Elle consiste à calculer la quantité d'eau par sommet en calculant le chemin vers le sommet le plus haut pouvant être atteint. Ainsi, la quantité d'eau n'est écrite qu'une seule fois en mémoire, lorsque le sommet le plus haut est trouvé, et il est possible de paralléliser le calcul

efficacement. De plus, chaque sommet pouvant atteindre l’approvisionnement d’eau se verra attribuer une quantité d’eau évitant ainsi le problème de régions sèches de l’approche *vers le bas*. Même si de cette manière l’eau peut être éparpillée sur une plus grande région que ce qui est réaliste, il faut se rappeler qu’au final ce sera les stalactites qui seront visualisées, non pas la quantité d’eau ou le parcours de l’eau.

---

**Algorithme 1:** Calcul des coefficients d’eau.

---

```

foreach sommet  $v$  provenant du maillage do
  Sommet courant  $c = v$ 
  Coefficient d’eau  $ce = 0$ 
  while il y a des sommets voisins plus haut que  $c$  do
    foreach sommet voisin plus haut  $n$  do
      // Plus haut par rapport à la gravité  $\mathbf{g}$ 
       $\mathbf{cn}$  = vecteur normalisé de  $c$  à  $n$ 
       $p$  = produit scalaire ( $\mathbf{cn}$ ,  $\mathbf{g}$ )
      Sélectionner voisin  $nmin$  pour lequel  $p$  est le plus petit
      // Le plus éloigné  $n$  par rapport à  $\mathbf{g}$ 
      if  $c$  ou  $nmin \in$  approvisionnement d’eau then
         $d$  = distance entre  $c$  et  $nmin$ 
        Multiplier  $d$  par  $-p$ 
        if seulement  $c$  ou  $nmin \in$  approvisionnement d’eau then
          /* Il y a moins d’eau puisqu’un des sommets n’est pas dans
          l’approvisionnement */
          Diviser le resultat par 2
           $ce = ce + resultat$ 
         $c = nmin$ 
    Sauvegarder  $ce$  dans le sommet  $v$ 

```

---

L’approche atteint les buts fixés en donnant des résultats très satisfaisants et en étant très rapide à calculer. Le calcul des coefficients d’eau est décrit dans l’algorithme 1. Lors du calcul itératif de la valeur du coefficient d’eau, l’objectif est d’accumuler plus d’eau lorsque la surface est plus grande (pris en compte par le facteur  $d$ ) et d’accumuler plus d’eau lorsque l’eau se propage le long d’une arête qui est plus orientée vers le haut (pris en compte par le facteur  $-p$ ). Il est ainsi possible de parcourir tous types de maillage, qu’ils représentent une surface plane ou courbée. Il existe toutefois deux scénarios qui posent problème lors du parcours de l’eau sur une surface. Tout d’abord, lorsque les objets sont composés de plusieurs sous-ensembles de

polygones qui ne sont pas connectés ou qui s'interpénètrent, il n'est pas possible de simplement parcourir la surface le long des arêtes. Le deuxième scénario s'applique aux maillages qui possèdent des détails inutiles au calcul de l'écoulement d'eau et qui peuvent augmenter le temps de calcul. Une solution est d'effectuer un prétraitement sur la surface afin que le parcours de l'eau s'exécute correctement et rapidement. Cette solution utilise une surface implicite créée à l'aide de Metaballs. Pour plus d'informations sur les metaballs, voir Annexe I

Pour effectuer le prétraitement sur la surface, cette dernière est donc recouverte de metaballs qui sont converties par la suite en maillage. Il en résulte une surface continue avec des angles plus réguliers. C'est sur cette nouvelle surface que le calcul du parcours de l'eau est ensuite effectué. Finalement, les coefficients d'eau  $c_e$  sont associés au maillage d'origine en utilisant les sommets les plus proches.

Afin de permettre à l'utilisateur de modifier les valeurs des coefficients d'eau  $c_e$ , ceux-ci sont transformés en code de couleurs pouvant être peintes ou modifiées de toute autre façon. Dans notre implémentation, des valeurs de rouge à bleu ont été utilisées dans l'espace de couleur HSV. Comme illustré sur la figure 3.3, le résultat est une surface dont la couleur sur chaque sommet tend vers le bleu, à mesure que la valeur du coefficient d'eau augmente.

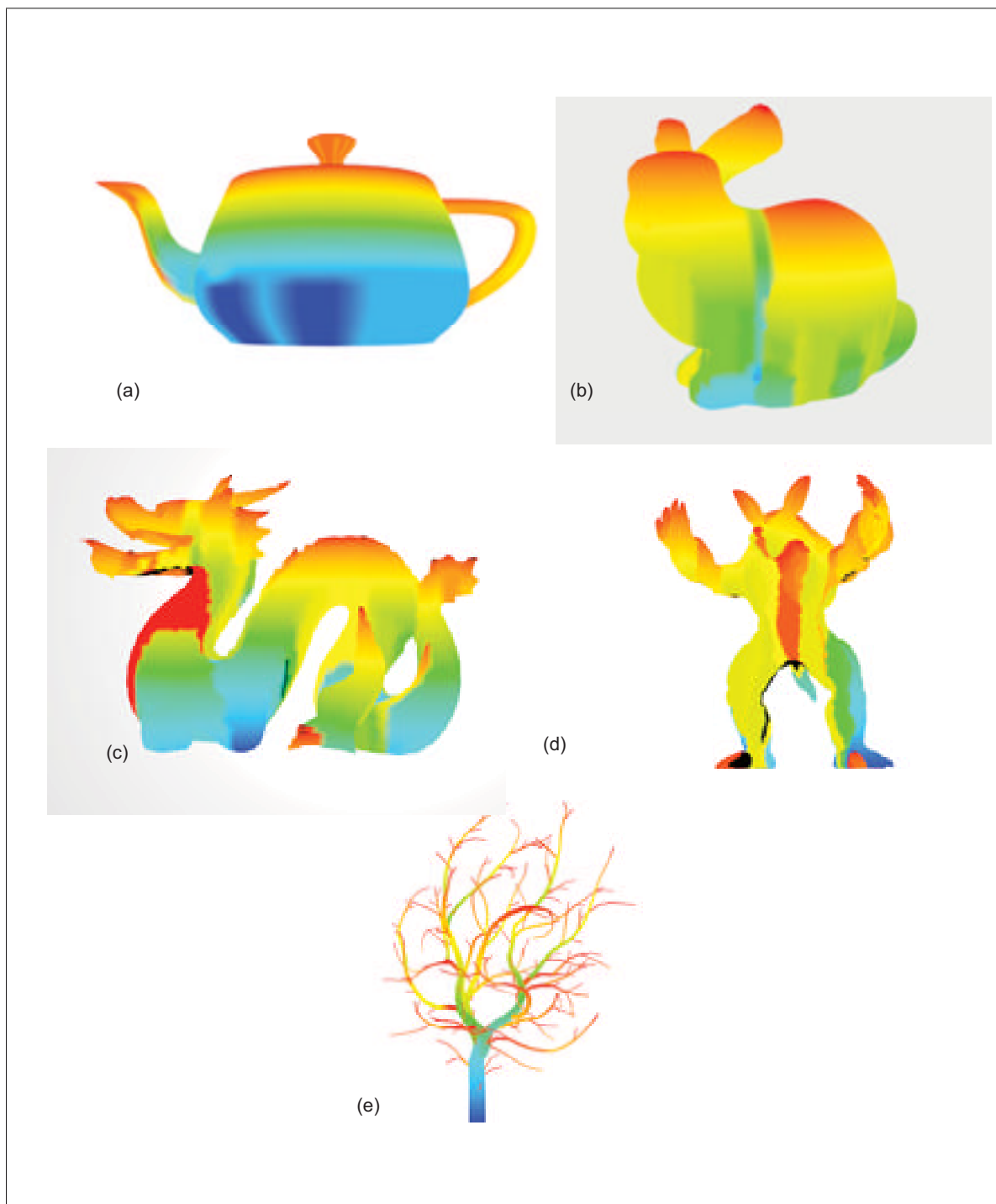


Figure 3.3 Coefficients d'eau sur différentes surfaces.

### 3.2 Point de chute

L'étape précédente a permis de déterminer les endroits où l'eau circule sur la surface et de calculer une quantité d'eau approximative sur chacun des sommets. C'est avec ces informations



qu'il sera possible de calculer les points de chute. Les coefficients d'eau permettent d'identifier les endroits où l'eau s'est accumulée. Il existe deux types d'accumulation : l'accumulation sur une surface concave et l'accumulation sur une surface convexe.

L'accumulation sur une surface concave indique les régions où l'eau reste coincée. L'accumulation sur une surface convexe indique quant à elle les régions où l'eau peut se détacher de la surface. C'est à ces régions que les stalactites peuvent se former. L'eau en général suit les lois de la gravité et chute s'il n'y a pas d'objet pour la soutenir. Cependant, à l'échelle des gouttes, l'eau a tendance à rester attachée aux surfaces même lorsque la surface pointe vers le bas. Une goutte se détache lorsque la quantité d'eau est suffisamment grande et que la surface est suffisamment inclinée. La zone à partir de laquelle les gouttes d'eau peuvent chuter est illustrée à la figure 3.4.

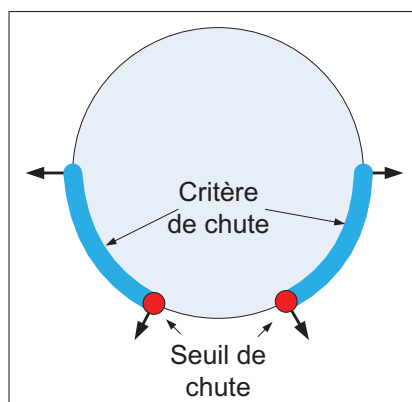


Figure 3.4 Critère de chute.

Le seuil de chute  $dl$  est spécifié par l'utilisateur sous la forme d'un angle par rapport au vecteur de gravité. Les polygones faisant partie de la *région de chute* sont ceux pour lesquels au moins un des sommets a un coefficient d'eau non nul, et dont la normale de chacun des sommets respecte le critère de chute présenté à la figure 3.4. Le résultat, comme illustré sur la figure 3.5, est un ensemble de polygones qui représente les régions d'où les gouttes d'eau peuvent se détacher. La *région de chute* peut être facilement éditée afin d'enlever certains endroits où l'utilisateur ne voudrait pas voir de stalactite. Par exemple il est inutile de calculer des stalactites au bas d'un objet qui reposera sur un autre, comme au bas de la théière.



Figure 3.5 Région de chute.

Si un objet a une forte courbure modélisée avec peu de polygones, il se peut qu'il y ait des zones où le critère de chute se manifeste, mais où aucun polygone ne respecte le critère d'orientation des normales pour tous ses sommets. Dans ce cas précis, l'approche proposée permet de positionner les stalactites sur les sommets et les arêtes où s'opère la transition d'orientation de normales qui traverse le critère de chute.

En fonction du nombre de stalactites que l'utilisateur indique en entrée, des points sont distribués aléatoirement sur la *région de chute*. Ces points sont les points de chute, comme illustré à la figure 3.6, sous la forme de cercles avec une couleur correspondant à la valeur du coefficient d'eau  $ce$ .

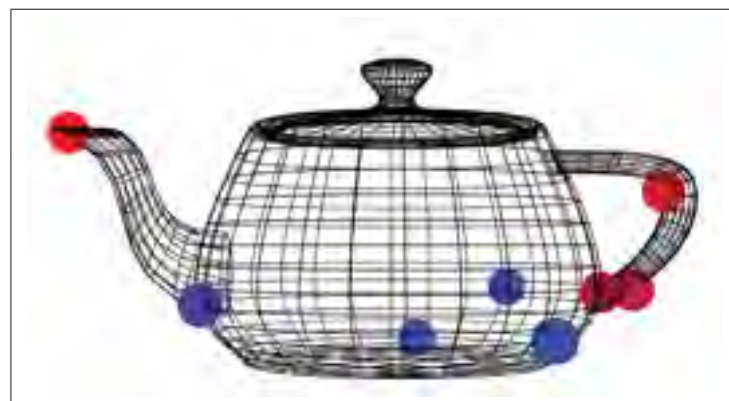


Figure 3.6 Point de chute.

L'ensemble des points de chute peut être modifié par l'utilisateur. Il est possible de changer la position des points et de changer le coefficient d'eau associé à chacun d'eux.

### **3.3 Définir la trajectoire des stalactites de glace**

La définition des trajectoires de stalactite est la troisième étape de l'approche proposée. Une trajectoire est instanciée à chaque point de chute. À partir du coefficient d'eau, la taille finale de la stalactite est calculée directement. Ceci est un autre avantage du découplage proposé de la simulation en étapes. Il n'est donc pas nécessaire de simuler itérativement la croissance de la stalactite, ce qui contribue à l'interactivité de l'approche.

Dans la nature, la croissance d'une stalactite dépend de plusieurs facteurs comme le changement de température, la direction du vent, la quantité d'eau d'approvisionnement, etc. Visuellement, il en résulte différents types :

- rectiligne, voir figure 3.7 ;
- courbé, voir figure 3.8 ;
- divisé, voir figure 3.9.

Il est ainsi possible de rencontrer des stalactites plus ou moins courbées et plus ou moins divisées ayant une longueur variable selon l'approvisionnement d'eau. Il est aussi possible que les stalactites fusionnent entre eux. Dans l'approche proposée, la fusion est toutefois traitée uniquement lors de la création de la surface.

L'étape du calcul des trajectoires propose des règles qui permettent de simuler différents types de croissance de stalactites. Pour la définition de ces règles, plusieurs images de stalactites comportant plusieurs branches ont été observées. D'après cette analyse, un L-System (Prusinkiewicz et Lindenmayer, 1990) qui reproduit les cas étudiés a été développé.



Figure 3.7 Photographie de stalactites rectilignes.

Pour permettre à l'utilisateur de contrôler l'apparence de la stalactite, différents paramètres sont utilisés :

- angle de roulis de départ  $e$  ;
- courbure  $c$  ;
- probabilité de division  $d$  ;
- angle de dispersion  $a$ .



Figure 3.8 Photographie d'une stalactite courbée.

Les règles qui donnent des résultats réalistes sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
 \omega & : / (e)FX \\
 p1' & : X \xrightarrow{1-d} +(c)FFF/(a)X \\
 p1'' & : X \xrightarrow{d} [(c)+(30^\circ)F-(30^\circ)FX]A \\
 p2 & : A \rightarrow +(c)FFF \setminus (a)X
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Le système utilise une prémisses  $\omega$  et trois règles ( $p1'$ ,  $p1''$  et  $p2$ ) qui sont illustrées à la figure 3.10. Pour plus d'information sur la notation des L-Systems, se référer à l'annexe II.

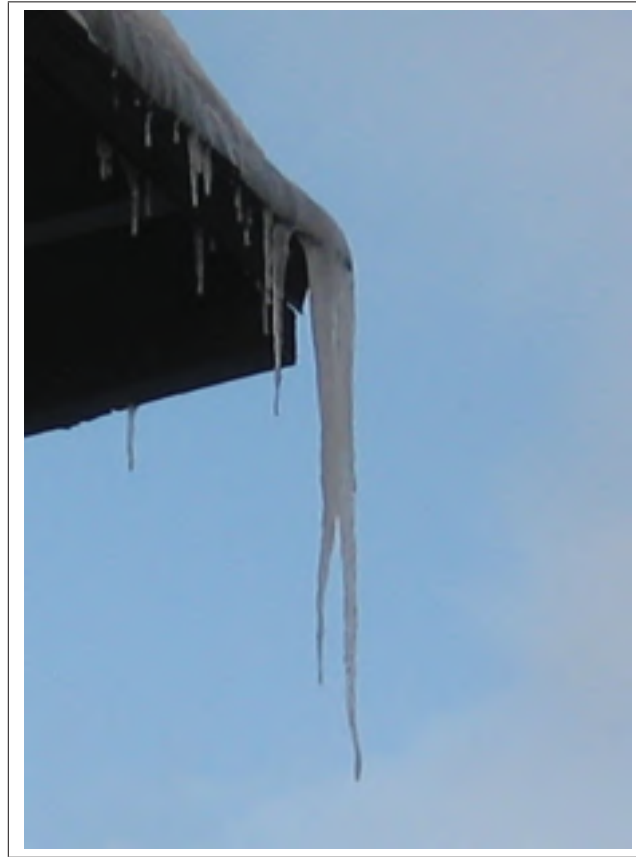


Figure 3.9 Photographie de stalactites qui fusionnent et qui se divisent.

La règle  $p1'$  représente une croissance rectiligne. La règle  $p1''$  représente la création d'une nouvelle branche. La règle  $p2$  représente la croissance du tronc après la création d'une branche. Le paramètre  $e$  représente l'angle du roulis de départ. Il détermine la direction que prendra la croissance de la stalactite. Le paramètre  $c$  représente la courbure. C'est l'angle utilisé lors de chaque pas ainsi que lors de la création d'une nouvelle branche. Le paramètre  $a$  représente le roulis effectué pendant la croissance. Il détermine l'irrégularité lors de la création des nouvelles branches de la stalactite ainsi que leur dispersion. Le paramètre  $d$  représente la probabilité de division. C'est la probabilité d'avoir une nouvelle branche. Le nombre de générations du L-System correspond à l'indice de croissance  $i$ . Cette valeur vient du coefficient d'eau associé au point de chute. L'utilisateur a toutefois la possibilité de modifier cette valeur.

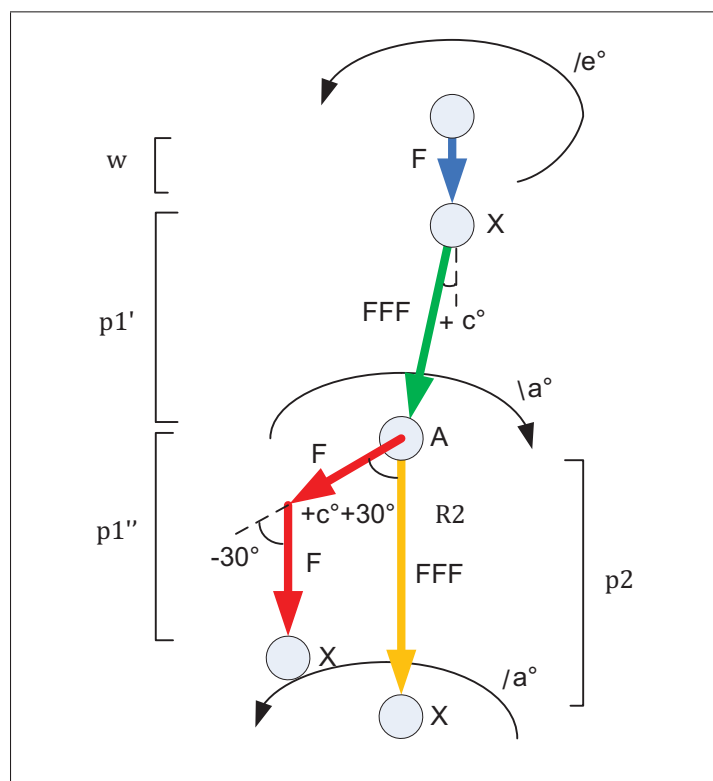


Figure 3.10 Illustration des règles du L-System.

L'angle du roulis  $a$  représente l'angle de dispersion. Chaque nouveau roulis est calculé comme suit :  $a = au \times 137,5^\circ / 360^\circ$  où  $au$  représente l'angle spécifié par l'utilisateur. La valeur  $137,5^\circ$  est un nombre utilisé lors de la création de plantes (Prusinkiewicz et Lindenmayer, 1990) afin de générer une croissance en spirale avec des proportions naturelles. Pour plus d'information sur l'utilisation de cet angle, se référer à l'annexe 1, section 5. Ainsi, lorsque  $au$  est égale à  $360^\circ$ , les branches croissent dans tous les sens de façon égale. Par contre, lorsque  $au$  est bas, les branches croissent plus ou moins dans le même sens. La figure 3.11 illustre plusieurs exemples de croissance de branches vues du haut avec différentes valeurs de  $au$ . Il est possible de constater que plus la valeur de  $au$  augmente, plus les branches sont dispersées. Ce paramètre permet donc à l'utilisateur de définir à quel point les branches des stalactites peuvent se répartir dans une direction donnée.

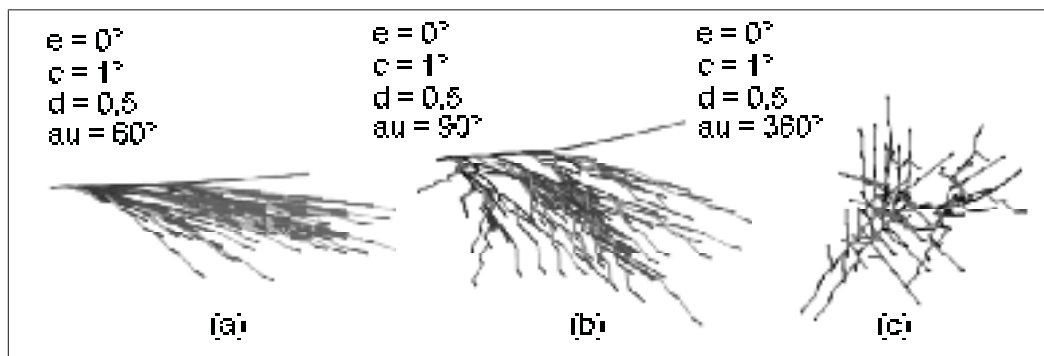


Figure 3.11 Exemples de dispersion de branches de stalactites.

L'angle de départ  $e$ , comme illustré sur la figure 3.12, affecte la direction que prendront les stalactites dans le cas où l'angle de dispersion est petit. Dans les exemples (a), (b) et (c) de la figure 3.12, l'angle de courbure  $c$  est égal à 5 et l'angle de dispersion  $d$  est égale à 0.

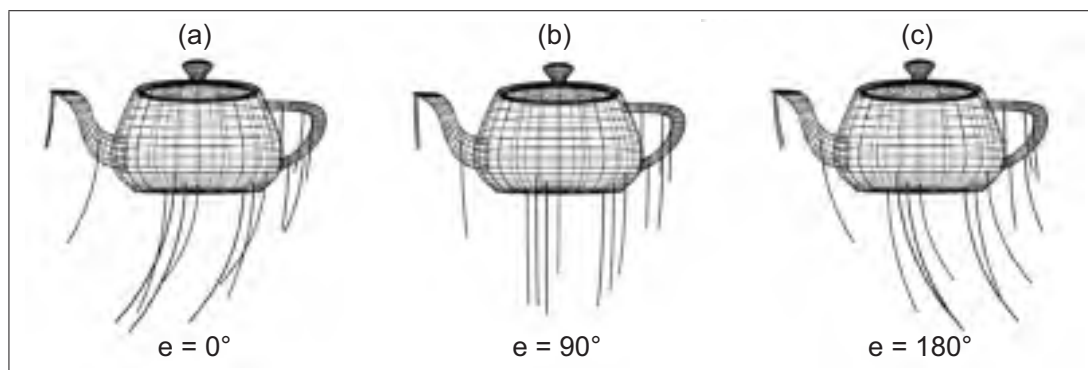


Figure 3.12 Exemples de trajectoires avec différents angles de départ.

L'angle de courbure  $c$  est utilisé sur chacune des générations du L-System. Pour créer une stalactite rectiligne, la variable de courbure doit être très basse de même que la variable de division (voir figure 3.13(a)). Lorsque  $c = 0$ , la stalactite suit une ligne parfaitement droite. Lorsqu'il y a du vent, cela produit des stalactites courbées qui peuvent être créées en ajustant la valeur de  $c$ , comme c'est le cas sur les figures 3.13(b) et (c).

Ainsi, plusieurs combinaisons sont possibles avec différentes valeurs comme il est possible de voir sur la figure 3.14.



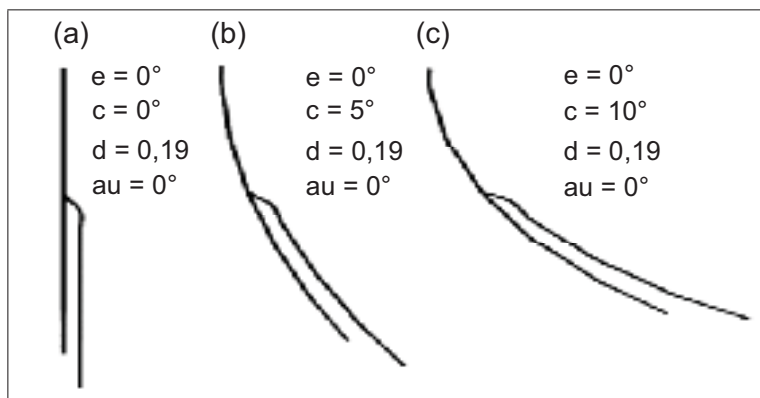


Figure 3.13 Trajectoires courbées.

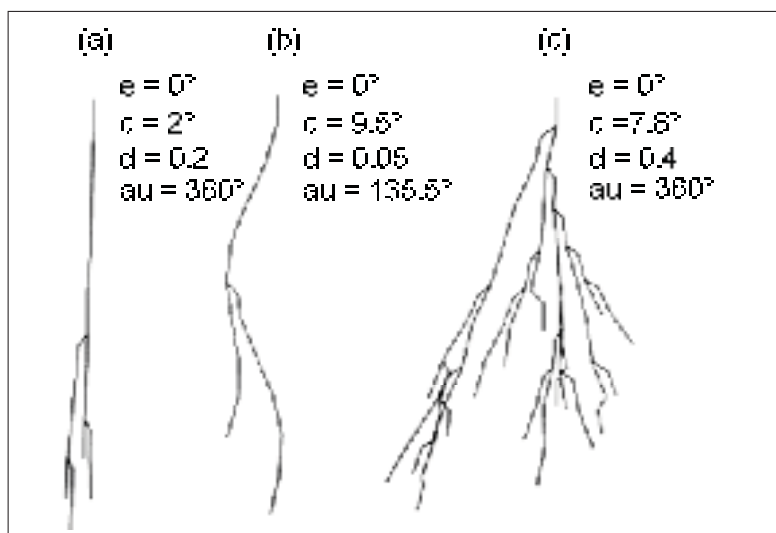


Figure 3.14 Plusieurs possibilités de trajectoires.

La trajectoire résultante est composée de points qui proviennent de chaque pas du L-System. La trajectoire servira de guide pour la modélisation de stalactites. Elle est paramétrable par l'utilisateur. De plus, le temps de calcul est presque instantané afin d'obtenir des trajectoires très différentes facilement, procurant ainsi une grande interactivité. La possibilité de visualiser de façon interactive les trajectoires est un avantage majeur comparativement aux approches basées sur une simulation physique, dans lesquelles le temps de simulation et le peu de contrôle sur les résultats gênent la créativité de l'utilisateur.

### 3.3.1 Gestion de la collision de la trajectoire

La stalactite, dans sa croissance, peut entrer en collision avec la surface d'un autre objet. Dans ce cas, elle suit la surface en direction de la gravité jusqu'à ce qu'elle atteigne la région de chute ou qu'elle s'arrête dans un creux de la surface. Ensuite, la trajectoire est poursuivie à partir du point d'entrée dans la région de chute. Il est ainsi possible, comme on peut le voir sur la figure 3.15, de mettre n'importe quelle surface sur la trajectoire de la stalactite initiale et d'avoir un résultat réaliste. Le calcul des collisions n'est pas fait lors du calcul des coefficients de passage. En effet, puisque c'est l'utilisateur qui détermine le nombre de stalactites désiré, c'est seulement après avoir défini les points de chute qu'il est utile de calculer s'il y a collision.

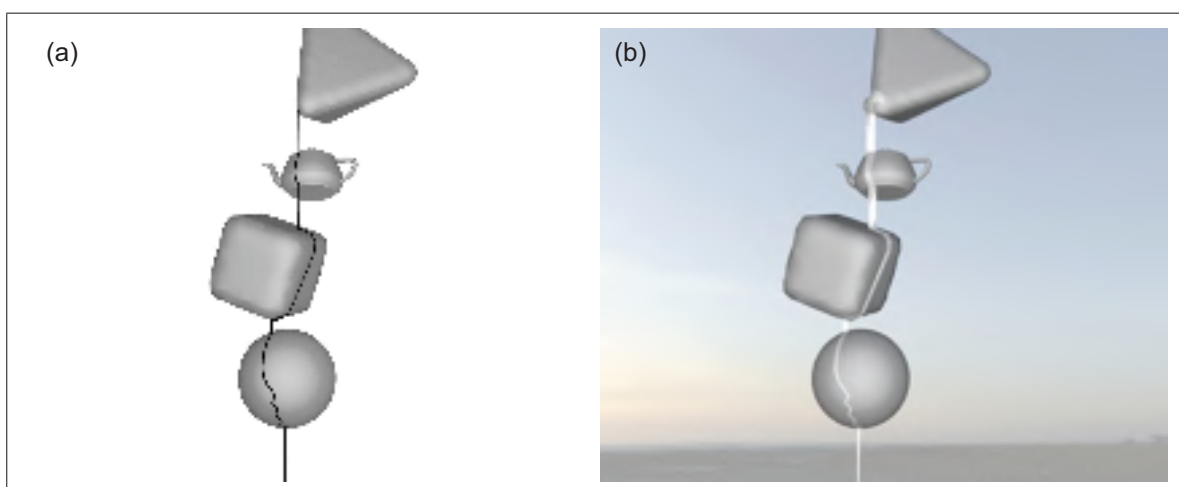


Figure 3.15 Résultat d'une trajectoire modifiée par des collisions.

### 3.4 Créer la surface des stalactites

Le calcul de la surface est la dernière étape de cette approche. Elle consiste à créer une surface autour de la trajectoire définie à l'étape précédente. La méthode proposée consiste à calculer le rayon de la stalactite pour chacun des points de la trajectoire. À cet effet, une fonction qui décrit un profil a été développée.

### 3.4.1 Profil

Afin de déterminer le profil adéquat, l'approche proposée s'inspire des travaux de glaciologie. En effet, une stalactite de glace croît 10 à 30 fois plus rapidement en longueur qu'en largeur (Makkonen, 1988) ce qui lui donne la forme d'un tube. Lorsque l'eau qui coule à la surface de la glace laisse une trace mouillée et que celle-ci gèle, cela crée une couche additionnelle qui affecte le diamètre de la stalactite (Kharitonsky et Gonczarowski, 1993). Ainsi, la couche additionnelle peut donner une forme conique à la stalactite selon la proportion des gouttes d'eau qui gèlent avant de se rendre à la pointe. Pour modéliser le tronc, nous avons donc besoin d'une fonction nous permettant de créer autant un tube qu'un cône. Les expérimentations de Maneo *et al.* (1994) ont démontré que le rayon de la goutte en suspend est en moyenne de 2,44 millimètres. La pointe des stalactites sera donc modélisée par un hémisphère de cette dimension. Il est possible d'avoir des stalactites qui ont une forme plus ou moins conique, mais aussi plus ou moins ondulée. À cet effet, trois variables sont disponibles pour l'utilisateur :  $f_o$  pour la fréquence d'ondulation,  $a_o$  pour l'amplitude de l'ondulation et  $t$  pour le taux de croissance qui détermine la forme conique. Ces variables sont utilisées dans la fonction de profil décrite à l'équation I.2.

$$R(x) = tip + (L - x) \times t + a_o \times \sin(x \times f_o) \quad (3.2)$$

Pour une position  $x$  donnée, de la base de la stalactite ( $x = 0$ ) jusqu'à la pointe ( $x = L$ ),  $R(x)$  représente le rayon de la stalactite. Dans l'équation I.2,  $tip$  représente le rayon de la pointe de la stalactite. La variable  $tip$  est ajustée à l'équivalent de 2,44 millimètres dans l'environnement 3D. Partant de la pointe et remontant vers la base de la stalactite, le rayon augmente selon  $(L - x) \times t$ . Ce deuxième terme est utilisé afin de représenter une forme plus ou moins conique. Finalement, le terme  $a_o \times \sin(x \times f_o)$  sert à calculer l'ondulation de la surface à l'aide des paramètres de fréquence et d'amplitude fournis par l'utilisateur.

### 3.4.2 Modélisation

Avec la fonction de profil, il est maintenant possible de générer une surface. La surface est construite grâce à l'utilisation de metaballs. De plus, ces dernières permettent la fusion entre plusieurs stalactites. Les metaballs sont positionnées sur les points de la trajectoire et le rayon des metaballs provient de la fonction de profil. Comme illustrée à la figure 3.17 (a)-(c), il est possible de générer des surfaces plus ou moins coniques et plus ou moins ondulées.

Tout comme pour l'approche de Kim *et al.* (2006), l'approche proposée utilise une sinusoïdale afin de simuler l'ondulation de la surface. L'application de la sinusoïdale donne comme résultat une surface très régulière. En effet, les ondulations de la stalactite sont symétriques ce qui n'est pas très réaliste. Comme il est possible de le constater sur la figure 3.16, l'ondulation devrait être plus aléatoire.



Figure 3.16 Photographie d'une stalactite de glace possédant une surface ondulée.

Afin de rendre la modélisation plus plausible, l'approche proposée permet d'ajouter du bruit non pas lors du rendu, comme c'est le cas dans l'approche de Kim *et al.* (2006), mais lors de la construction de la surface. Plutôt que de mettre les metaballs uniquement le long de la

trajectoire, elles peuvent subir une translation dans le plan perpendiculaire à la trajectoire. Cette perturbation aléatoire est contrôlée par un paramètre de bruit noté  $cb$ . À partir du point de la trajectoire, le centre de la metaball est déplacé aléatoirement d'une distance  $d$  au plus  $eb$  dans le plan perpendiculaire à la trajectoire. Comme illustrée sur la figure 3.17(d)-(f), le résultat est moins régulier et plus réaliste. De plus, la forme générale, l'ondulation et le bruit peuvent être ajustés afin de correspondre assez bien à ce qu'il est possible d'observer sur des photographies de vraies stalactites de glace (Figure 3.16).

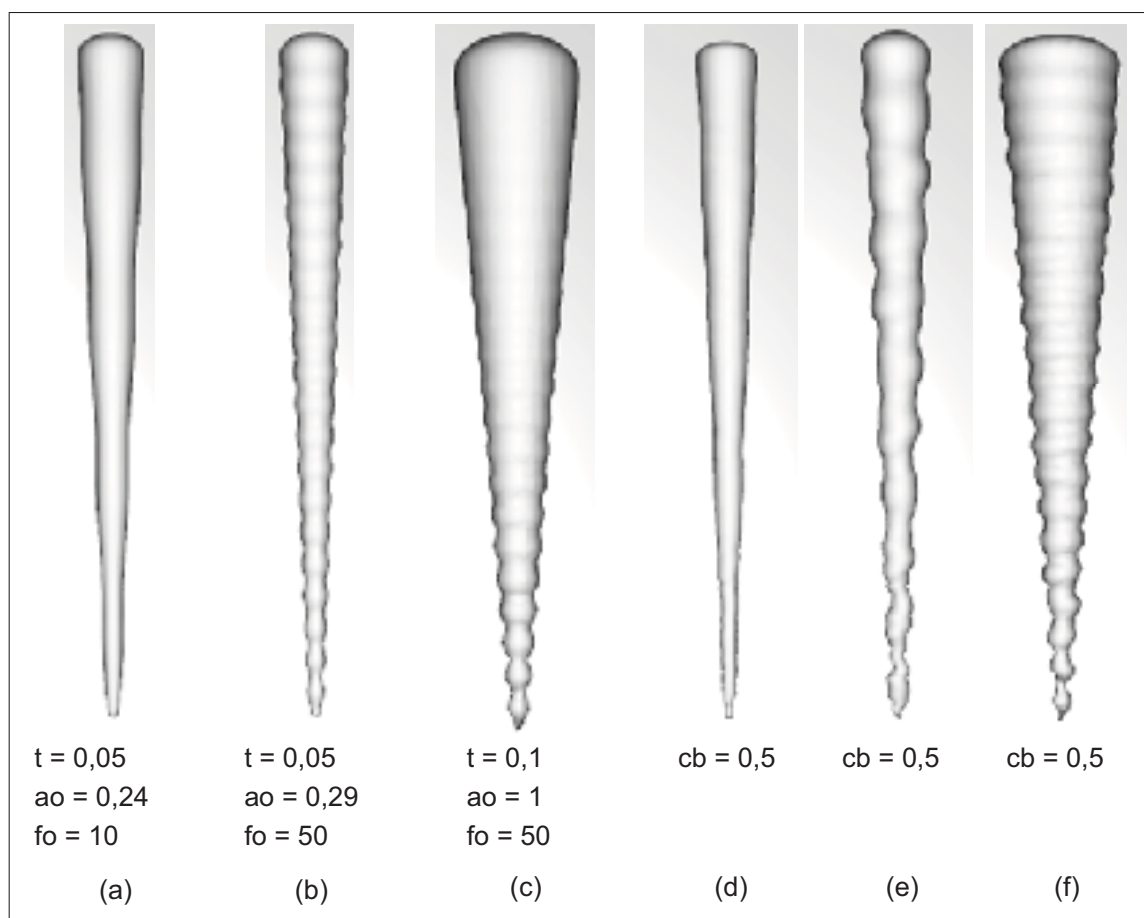


Figure 3.17 Contrôle de la surface de la stalactite de glace.

Comme il est possible de le voir sur la figure 3.18, le résultat de la modélisation est très proche de la réalité.



Figure 3.18 Comparaison d'une modélisation (droite) avec une vraie stalactite de glace (gauche).

### 3.4.3 Base de la stalactite

La base de la stalactite est l'endroit où elle s'attache à la surface de l'objet. Comme il est possible de le voir sur la figure 3.19, sa forme est plutôt variable et est influencée par la quantité d'eau de l'approvisionnement. Il est possible d'observer dans la nature que l'épaisseur de glace sur la surface augmente considérablement plus celle-ci est proche du point de chute.

Afin de calculer la surface de la base de la stalactite, un ensemble de metaball est distribuée sur la surface de l'objet autour du point de chute jusqu'à une distance  $eb$  spécifiée par l'utilisateur et qui représente l'étendu de la base. Le nombre de metaball distribuée sur la surface est spécifié



Figure 3.19 Photographie de plusieurs stalactites ainsi que leur base.

par l'utilisateur et est noté  $nbmb$ . Le rayon de chaque metaball est calculé comme suit :

$$rb = \frac{(eb - d)^2}{eb^2} \times ce \quad (3.3)$$

où  $d$  est la distance entre la position du point de chute et le point courant et où  $ce$  est le coefficient d'eau. Le résultat, comme illustré sur la figure 3.20, est une base de stalactite qui s'adapte bien à la surface. Les exemples de la figure 3.20 sont (a) une sphère, (b) un cube après une rotation et (c) une théière.

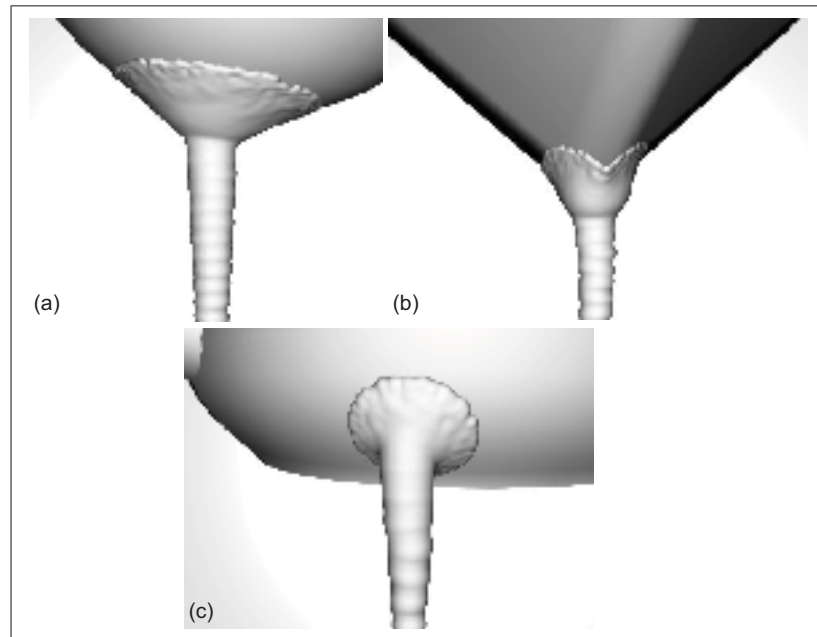


Figure 3.20 Bases de stalactites sur différentes surfaces courbées.

### 3.4.4 Verglas

Lorsque les stalactites sont combinées avec une surface de verglas, il en résulte un maillage qui recouvre la surface de départ de glace comme illustré à la figure 3.21. Il est possible d'observer trois types de solidification :

- l'eau atteint la surface et gèle rapidement, figure 3.21(a) ;
- l'eau atteint la surface et gèle plus lentement, figure 3.21(b) ;
- l'eau tarde à geler sur la surface, figure 3.21(c).

Le verglas se calcule à l'aide des coefficients d'eau et d'un coefficient appelé *durée de vie d'une goutte d'eau*, noté  $dv$ . Des metaballs sont distribuées aléatoirement sur la surface en fonction de la dimension de celle-ci. Le nombre utilisé est une variable définie par l'utilisateur notée  $nver$ . Afin de générer les différents types de verglas de la figure 3.21, l'équation 3.4 a été développée :

$$rv = minVer + s \times [dHaut \times dv + dBas \times (1 - dv)] \quad (3.4)$$



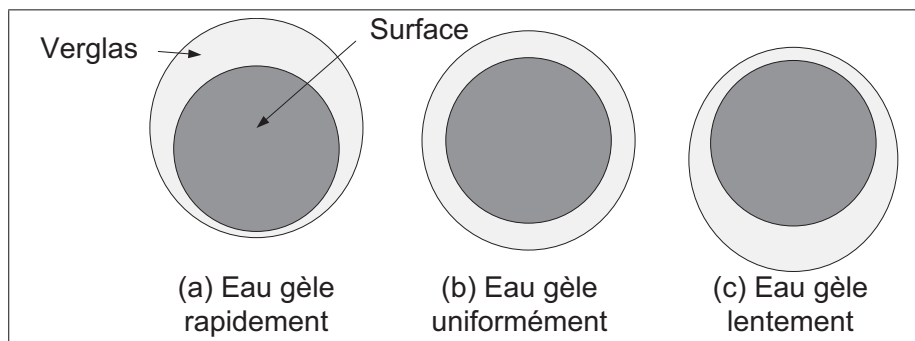


Figure 3.21 Différents types de verglas.

où  $r_v$  est le rayon de la metaball placée sur la surface,  $d_{Haut}$  est la valeur de distance entre le sommet courant et le sommet le plus haut,  $d_{Bas}$  est la valeur de la distance entre le sommet courant et le sommet le plus bas de la région de chute,  $minVer$  est l'épaisseur minimum du verglas,  $s$  est le ratio de dimension du verglas. Tel que présenté à la figure 3.22, lorsque la valeur de  $d_v$  est égale à 0, le premier type de verglas est obtenu, 0,5 procure le deuxième et 1, le troisième.

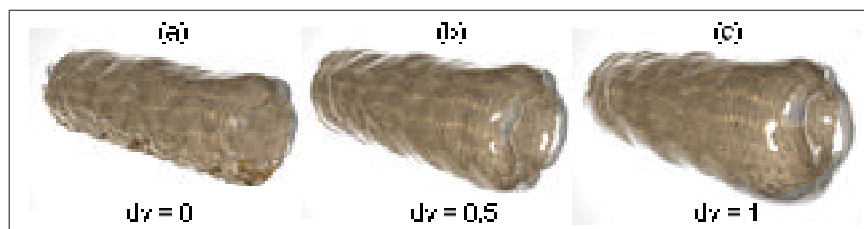


Figure 3.22 Rendu de différents types de verglas.

## CHAPITRE 4

### RÉSULTATS

L'approche proposée permet de créer avec succès des stalactites et du verglas sur différentes surfaces complexes. Son utilisation permet un bon contrôle sur l'allure du résultat final. Ce contrôle se fait à l'aide de plusieurs paramètres présentés au tableau 4.1. Bien qu'il y ait plusieurs paramètres, l'utilisateur n'en manipule typiquement qu'un sous-ensemble. Par exemple, seuls les six paramètres  $ns$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $fo$ ,  $ao$  et  $cb$  doivent être ajustés pour produire tous les résultats présentés dans cette section.

Pour les tests, plusieurs surfaces différentes ont été utilisées. Les résultats se trouvent sur les figures 4.1 à 4.8 qui ont été générées chez Mokko Studio, et les temps de calcul pour chacune des phases se trouvent dans le tableau 4.3. Les maillages des figures 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 proviennent du *Computer Graphics Laboratory* de l'Université de Stanford. Le maillage de la figure 4.7 provient de l'Université de Calgary.

Afin de créer les stalactites plus ou moins ondulées de la théière de la figure 4.1, une faible amplitude a été utilisée avec un peu de bruit. Pour les stalactites lisses de la fontaine de la figure 4.2, les valeurs d'ondulation et de bruit sont très faibles. Concernant les stalactites courbées et ondulées du Happy Buddha de la figure 4.3, les valeurs d'ondulation et de bruit sont plus élevées. De plus, afin de créer un verglas bosselé, le nombre de metaballs a été ajusté afin qu'elles soient suffisamment distancées entre elles pour réaliser cette effet. Le bunny de Stanford de la figure 4.4 quant à lui contient une plus faible fréquence d'ondulation et une plus grande probabilité d'avoir des divisions. Il est ainsi possible de constater que deux stalactites contiennent des divisions. Pour l'armadillo de la figure 4.5, la fréquence a été ajustée au maximum afin de créer des glaçons très ondulés. La même amplitude a été utilisée pour le dragon de Stanford (figure 4.6) mais cette fois-ci avec une fréquence plus petite. L'arbre de la figure 4.7 a été modélisé avec des glaçons lisses utilisant des valeurs semblables à celles de la fontaine. Les valeurs de test se retrouvent dans le tableau 4.2. Finalement, la figure 4.8 représente un

Tableau 4.1 Paramètres de contrôle

	Description	Domaine	Valeur type
<b>Coefficients d'eau</b>			
<i>ss</i>	Surface source	-	-
<i>g</i>	Vecteur de gravité	-	(0 -1 0)
<i>nr</i>	Nombre de rayons	]1..∞[	500
<i>rii</i>	Rayon d'influence à l' intersection	]0..∞[	1
<b>Points de chute</b>			
<i>ns</i>	Nombre de stalactites	]1..∞[	10
<i>dl</i>	Seuil de chute	]1..90°[	75°
<b>Trajectoires</b>			
<i>e</i>	Roulis de départ	[0..360°[	0°
<i>c</i>	Angle de courbure	[0..360°[	2°
<i>d</i>	Probabilité de division	[0..1[	0,1
<i>au</i>	Angle de roulis de croissance et de dispersion	[0..360°]	360°
<b>Modélisation de la surface</b>			
<i>t</i>	Ratio de croissance	[0..∞[	0,05
<i>ao</i>	Amplitude de l'ondulation	[0..∞[	0,3
<i>fo</i>	Fréquence de l'ondulation	[0..∞[	50
<i>eb</i>	Étendu de la base	[0..∞[	1
<i>nmb</i>	Nombre de metaballs à la base	[1..∞[	100
<i>cb</i>	Coefficient de bruit	[0..∞[	1
<b>Verglas</b>			
<i>minVer</i>	Rayon minimum du verglas	[0..∞[	0
<i>nver</i>	Nombre de metaballs utilisée pour le verglas	[0..∞[	5000
<i>s</i>	Dimension du verglas	[0..∞[	1
<i>dv</i>	Durée de vie de la goutte d'eau	[0..1]	0,5

zoom sur des branches qui ont été modélisées chez Mokko Studio. Les mêmes valeurs que sur la figure 4.7 ont été utilisées. Le nombre de stalactites visibles peut sembler plus petit que la valeur *ns* entrée. La raison en est que plusieurs stalactites peuvent se retrouver très proches

Tableau 4.2 Paramètres de contrôle utilisés lors des différents tests

Paramètres	Figures						
	(4.1)	(4.2)	(4.3)	(4.4)	(4.5)	(4.6)	(4.7)
<i>ns</i>	12	100	30	20	200	200	400
<i>c</i>	0°	0,1°	0,5°	3°	10°	3°	0,8°
<i>d</i>	0,1	0,1	0,1	0,3	0,015	0,075	0
<i>fo</i>	50	100	500	50	500	100	50
<i>ao</i>	1	1,7	1,45	0,3	0,3s	0,3	1,3
<i>cb</i>	0,5	0,1	1,5	0,4	0,4	0,4	0,5



Figure 4.1 Stalactites de glace sur une théière.

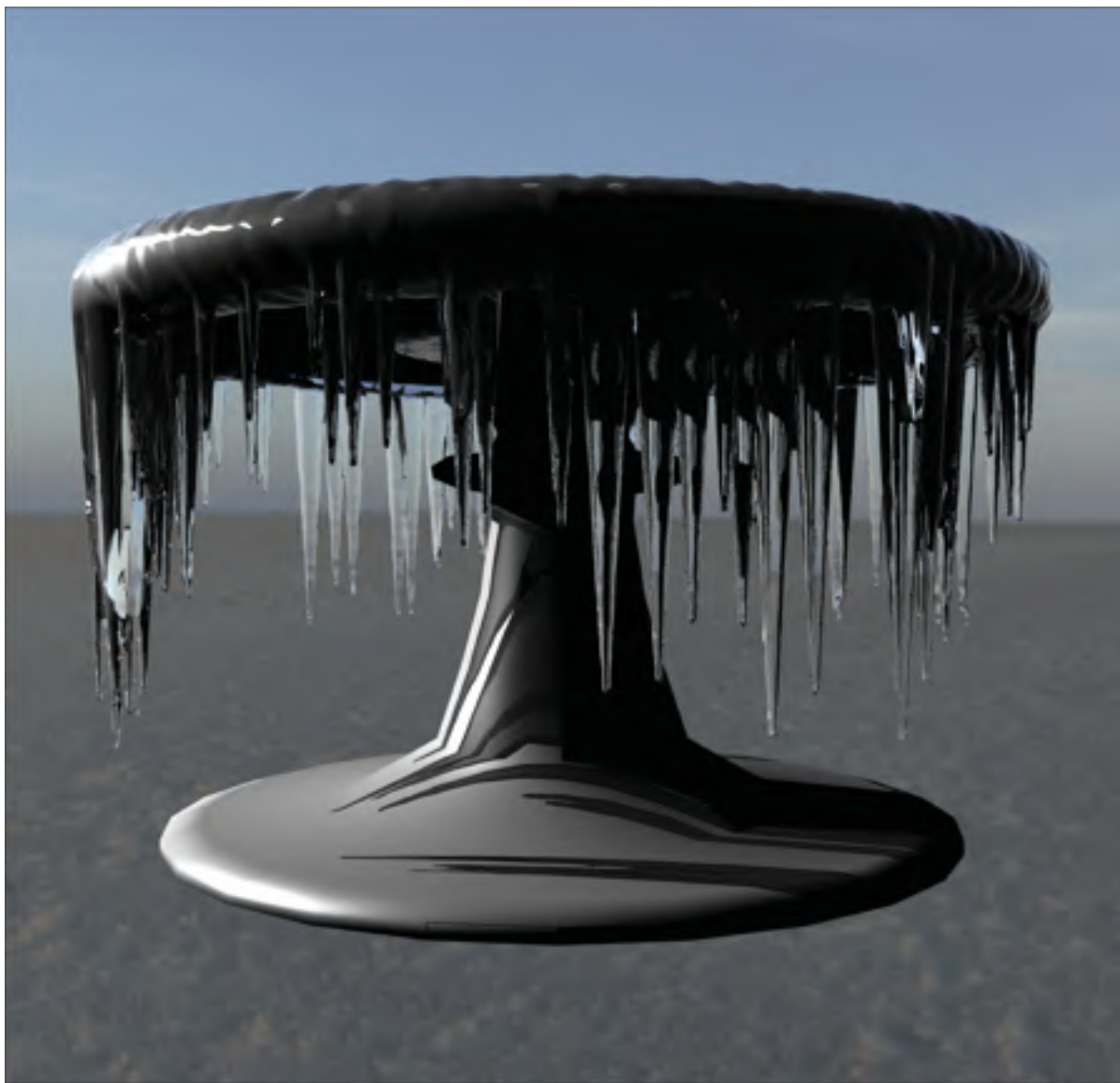


Figure 4.2 Stalactites de glace sur une fontaine.

les unes des autres et ainsi fusionner. De plus, certaines stalactites peuvent se retrouver tout simplement de l'autre côté de l'objet et ainsi être cachées.

Les évaluations ont été effectuées sur un Intel Xeon 3,4 Ghz. Afin de créer des images réalistes, le moteur de rendu *Mantra* de *SideFx* a été utilisé pour générer les images qui se trouvent dans ce mémoire. Comme il est possible de le constater, l'approche proposée est relativement rapide comparativement aux travaux antérieurs. En effet, à titre de comparaison, la fontaine dans l'ar-



Figure 4.3 Stalactites de glace sur le Happy Buddha de Stanford.

ticle de Kim *et al.* (2006) (figure 5 de leur article) prenait 30 minutes à simuler (sur un Pentium 4 3 GHz) et ici elle prend environ 55 secondes (sur un Xeon 3,4 GHz double coeur). Quoique les stalactites générées sont de qualité visuelle comparable au travail de Kharitonsky et Gonczarowski (1993), l'approche proposée permet en plus de positionner les glaçons automatiquement sur la surface à des endroits plausibles et génère une surface de glace convaincante qui attache la stalactite à la surface de l'objet. Par conséquent, il est possible de modéliser des centaines de stalactites sur des surfaces beaucoup plus complexes, tel un arbre, en un temps raisonnable.



Figure 4.4 Stalactites de glace sur le bunny de Stanford.



Figure 4.5 Stalactites de glace sur l'armadillo de Stanford.





Figure 4.6 Stalactites de glace sur le dragon de Stanford.



Figure 4.7 Stalactites de glace sur un arbre.



Figure 4.8 Zoom sur des stalactites de glace sur les branches d'un arbre.

Tableau 4.3 Statistiques des résultats

<b>Figures</b>	<b>(4.1)</b>	<b>(4.2)</b>	<b>(4.3)</b>	<b>(4.4)</b>	<b>(4.5)</b>	<b>(4.6)</b>	<b>(4.7)</b>
<b>Nombre de polygones en entrée (en millier)</b>	2	2	15	4	30	11	6
<b>Nombre de stalactites</b>	12	300	10	20	200	200	400
<b>Nombre de polygones en sortie(en millier)</b>	10	180	750	103	390	245	131
<b>Temps de calcul (secondes)</b>							
<b>Coefficients d'eau</b>	0,1	0,1	0,5	0,3	5	0,4	0,3
<b>Point de chute</b>	0,1	0,5	0,2	0,1	0,5	0,5	0,5
<b>Trajectoires</b>	0,1	0,2	0,1	0,2	0,5	0,5	1
<b>Modélisation de la surface</b>	11	55	60	20	116	19,5	36
<b>Temps total (secondes)</b>	11,3	55,8	60,8	20,6	122	20,9	37,8

## **CHAPITRE 5**

### **LIMITATIONS**

La création de stalactite en forme de lame nécessite la manipulation des glaçons à l'unité. En effet, puisque la forme de lame dépend essentiellement de la forme de la surface de l'objet, il est souvent nécessaire à l'utilisateur d'effectuer une rotation une fois que la stalactite est aplatie, et ce, pour chacune des stalactites affectées, ce qui peut s'avérer redondant.

Afin d'obtenir un temps de calcul rapide permettant une utilisation interactive, certains compromis concernant la précision du phénomène de solidification ont été faits. L'approche n'utilise pas les équations de simulation de fluide pour calculer le mouvement de l'eau sur les objets. L'approche proposée permet plutôt une modélisation qui soit proche de la réalité sans toutefois être basée sur une simulation physique. Le résultat sortant ne peut être considéré comme étant une représentation physiquement précise. L'approche proposée est un compromis entre fidélité, et esthétique, efficacité et contrôle.

## CHAPITRE 6

### TRAVAUX FUTURS

L'approche proposée est rapide, mais n'est pas instantanée. L'utilisateur peut avoir une bonne idée du résultat final à partir des trajectoires qui sont calculées en moins d'une seconde. Par contre, la construction de la surface peut prendre beaucoup plus de temps. Une solution pour corriger ce problème serait de procurer une prévisualisation de la surface sans l'utilisation des metaballs qui prend du temps. Le calcul de la surface finale devrait être aussi accéléré. Au lieu d'utiliser des metaballs, le calcul direct du maillage de la stalactite pourrait être investigué.

La création de la surface verglacée est elle aussi assez lourde en temps de calcul. En même temps, comme mentionné dans la section 3.1, une surface alternative est parfois requise pour calculer le parcours de l'eau. Une approche unifiée adaptée à partir de la méthode de reconstruction de la surface devrait être développée, avec le temps de calcul et le lissage de la surface en tête.

L'approche proposée traite essentiellement de la modélisation de la surface des stalactites de glace sans gérer le rendu. Il serait intéressant de développer, à l'instar de la méthode de Kim *et al.* (2006), une manière de rendre les stalactites de façon réaliste et rapide. En effet, afin de générer une image réaliste qui respecte les phénomènes optiques que sont la réflexion et la réfraction, caractéristiques de la glace, un lancer de rayon doit être utilisé. Malheureusement, cette technique de rendu est très lourde en temps de calcul. De plus, il existe plusieurs types de surface de glace : mouillé, sec, sale, etc. Il n'existe aujourd'hui aucune méthode gérant tous ces types de rendu de façon efficace. Maintenant que la modélisation de stalactite de glace peut être effectuée rapidement et interactivement, le moment est venu de s'attaquer au rendu.

## CONCLUSION

L'approche proposée démontre qu'il est possible de subdiviser un problème complexe, tel que la simulation de la formation de stalactites de glace, en plusieurs étapes interactives. Dans l'approche proposée, le processus de glaciation est décomposé en quatre étapes. La première étape consiste à déterminer comment l'eau parcourt la surface de l'objet. Elle est composée de deux sous étapes : définir l'approvisionnement d'eau et parcourir la surface en calculant les coefficients d'eau. L'approche proposée effectue efficacement le parcours de sommet en sommet et le calcul peut être facilement parallélisé.

La deuxième étape permet de déterminer les points de chute. Elle est composée de deux sous-étapes : déterminer les régions de chute et positionner les points de chute. Les régions de chutes sont formées de polygones où les points de chute sont ensuite positionnés aléatoirement.

La troisième étape génère les trajectoires des stalactites de glace. Un L-System a été défini à cet effet. Il permet de faire une très grande variété de croissance de glace. L'utilisateur peut ainsi changer la courbure, la probabilité de division, l'angle de roulis de départ et la dispersion des branches. De plus, la détection de collision entre la trajectoire et d'autres surfaces est supportée.

La quatrième étape est la construction de la surface. Une surface est construite autour de chaque trajectoire précédemment générée. Le rayon de la surface est défini à l'aide d'une fonction de profil. Grâce à celle-ci, l'ondulation et la forme conique de la surface peuvent être modifiées par l'utilisateur. Une perturbation aléatoire est utilisée sur le positionnement des metaballs afin de créer une ondulation plus plausible. Des metaballs sont ensuite utilisées afin de gérer la fusion entre plusieurs stalactites. Finalement, la surface peut être recouverte de différents types de verglas à l'aide d'une équation qui gère l'épaisseur de la glace sur la surface.

L'avantage de cette division en étapes est le contrôle et l'interactivité : l'utilisateur a accès à plusieurs paramètres et peut voir le résultat de la modélisation en quelques secondes. Chacune des étapes est relativement rapide. Le temps de calcul total est considérablement plus rapide

qu'une simulation basée sur la physique. Le résultat est une modélisation photo réaliste de stalactites de glace semblable aux résultats d'une simulation physiquement correcte.

## ANNEXE I

### METABALL

Les metaballs font partie de la famille des surfaces implicites. La forme de la surface composée de  $n$  metaballs est définie par l'équation suivante :

$$f(x, y, z) = \sum_{i=0}^n q_i f_i - T_0 = 0 \quad (\text{I.1})$$

où  $T_0$  est un seuil constant,  $q_i$  est la densité maximum et  $f_i$  est la fonction de densité de la metaball  $i$ . Il existe plusieurs fonction  $f_i$  dans la littérature. Celle qui est utilisée dans ce travail est celle de Wyvill *et al.* (1986) qui est décrite comme suit :

$$f_i(r) = -\frac{4}{9} \left( \frac{r}{R_i} \right)^6 + \frac{17}{9} \left( \frac{r}{R_i} \right)^4 - \frac{22}{9} \left( \frac{r}{R_i} \right)^2 + 1 \quad (\text{I.2})$$

où  $r$  est la distance entre le point  $(x, y, z)$  et le centre de la metaball.  $R_i$  est le rayon d'influence de la metaball  $i$ .

Comme il est possible de le voir sur la figure I.1, l'utilisation de metaballs, possédant ici des rayons identiques, permet de déformer les surfaces de deux sphères et même de les fusionner en fonction de la distance qui le sépare. Pour plus d'information sur les metaballs, se référer à l'article de Wyvill *et al.*, (1986).



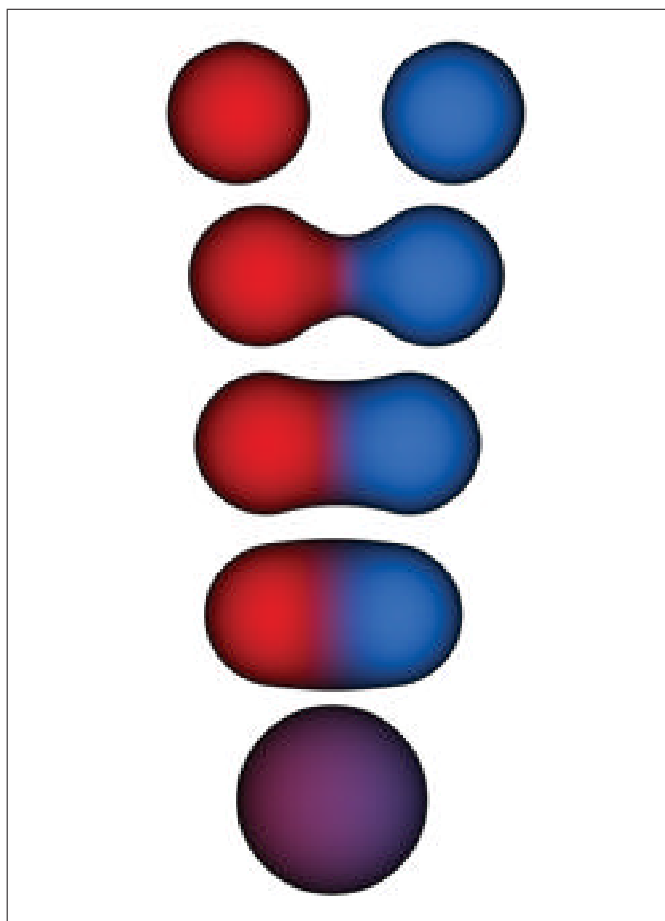


Figure I.1 Différentes interactions entre deux metaballs

## ANNEXE II

### L-SYSTEM

#### 1 Définition d'un L-System

Un L-system (ou système de Lindenmayer ) est une grammaire formelle permettant de décrire le processus de croissance d'êtres vivants. Il a été conçu à l'origine comme une théorie mathématique du développement des plantes. Le concept central des L-System est la réécriture. Le but est de générer une chaîne de caractère et ensuite de l'interpréter comme une suite de commande qui contrôle une *tortue*. Pour de plus amples informations, il est suggéré au lecteur le livre de référence *Algorithmic beauty of plants* de Prusinkiewicz et Lindenmayer (1990). Les figures qui se trouvent dans cette annexe ont été produites chez Mokko Studio.

#### 2 Les variables

Un L-System est défini par une prémisse  $\omega$  et un ensemble de règles de réécriture du système notée  $P$ . Une production est noté  $a \rightarrow b$ .  $a$  est appelé le prédécesseur et  $b$  le successeur.

### 3 Interprétation de la tortue

Afin de créer un résultat graphique, la chaîne caractère générée par le L-System doit être interprétée. À cet effet, plusieurs symboles sont utilisés afin de dessiner le résultat à l'aide de ce qui est appelé une tortue. Ces symboles sont les suivants :

$a$  : angle utilisée lors des déplacements de la tortue

$d$  : longueur des pas de la tortue

$n$  : nombre de génération

$F$  : se déplacer d'un pas d'une distance de  $d$  en dessinant une ligne

$f$  : se déplacer d'un pas d'une distance de  $d$  sans dessiner de ligne

$+$  : tourner à gauche de l'angle  $a$

$-$  : tourner à droite de l'angle  $a$

$\&$  : pivoter vers le bas d'un angle  $a$

$\wedge$  : pivoter vers le haut d'un angle  $a$

$\backslash$  : roulis à gauche de l'angle  $a$

$/$  : roulis à droite de l'angle  $a$

$|$  : tourner sur soi-même de  $180^\circ$

$\square$  : création d'une branche

Lorsque l'utilisateur veut utiliser un angle autre que l'angle  $a$ , il lui faut utiliser des parenthèses à la suite de l'opération. Par exemple, pour tourner à gauche de  $90^\circ$ , il faut écrire  $+(90)$ .

#### 4 Courbe de Koch

Afin de visualiser ce qu'il est possible de créer à l'aide d'un L-System, voici l'exemple de la courbe de Koch :

$$a : 90^\circ$$

$$\omega = F$$

$$p1 : F \rightarrow F + F - F - F + F$$

Le résultat de la réécriture après zéro génération de la règle  $P1$  est le suivant :

$$n = 0 : F$$

Après une génération de la règle  $P1$  :

$$n = 1 : F+F-F-F+F$$

Après deux générations de la règle  $P1$  :

$$n = 2 : F+F-F-F+F + F+F-F-F+F - F+F-F-F+F - F+F-F-F+F + F+F-F-F+F$$

Et ainsi de suite :

$$\begin{aligned} n = 3 : & F+F-F-F+F+F-F-F+F-F-F+F-F-F+F-F-F+F-F-F+F + F+F-F-F+F+F-F-F- \\ & F+F-F-F-F-F+F-F-F+F-F-F+F-F-F+F - F+F-F-F+F+F-F-F+F-F-F+F-F-F+F-F-F+F-F-F+F- \\ & F-F+F - F+F-F-F+F+F-F-F+F-F-F+F-F-F+F-F-F+F-F-F+F + F+F-F-F+F+F-F-F- \\ & F+F-F-F-F-F+F-F-F+F-F-F+F-F-F+F \end{aligned}$$

Lorsque les symboles sont générés, il est maintenant possible de les interpréter afin d'avoir un résultat graphique. L'interprétation des symboles par la tortue est illustrée sur la figure II.1. Pour plus d'exemple sur l'interprétation graphique de la tortue, voir Prusinkiewicz et Lindenmayer (1990), chapitre 1.

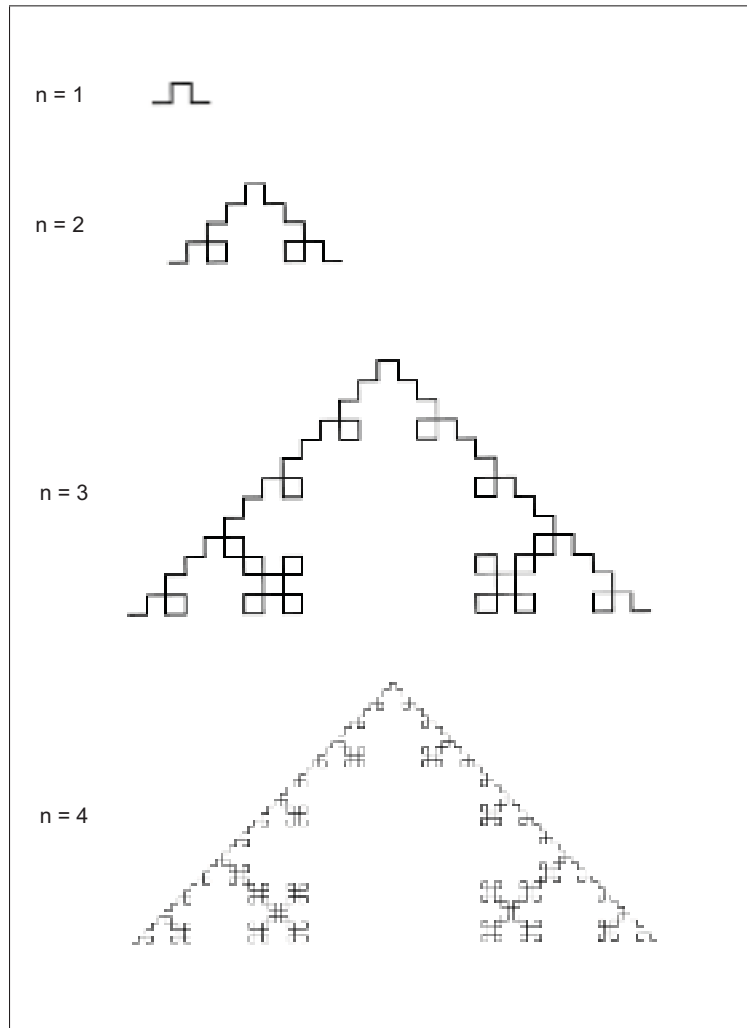


Figure II.1 Courbe de Koch.

## 5 Probabilité des règles

Dans le cas où le L-System est composé de plusieurs règles avec le même prédécesseur, une variable de probabilité peut être affectée à chacune de ces règles. Par exemple, deux règles  $P1$  et  $P2$  notées comme suit :

$$p1 : a \rightarrow ba$$

$$p2 : a \rightarrow ca$$

Lorsqu'il y a plusieurs instances de la même règle, il est possible de spécifier la probabilité que chacune d'elles soient utilisées à chaque génération. Par exemple, pour  $P1'$  et  $P1''$  ayant une probabilité de 33% et de 66% respectivement, la notation est la suivante :

$$p1' : a \xrightarrow{.33} ba$$

$$p1'' : a \xrightarrow{.66} ca$$

## 6 L'angle d'or

L'angle d'or 137,5 est très souvent utilisé dans les L-System afin d'avoir une croissance répartie de façon homogène dans l'espace. Par exemple, pour la création de pétales, le L-System suivant peut être utilisé :

$$\omega : a(0)$$

$$P1(n) : a(n) \rightarrow +(137.5)f(n \wedge 0.5)Ja(n+1)$$

où J est la variable permettant de dessiner un cercle. Grâce à l'utilisation de l'angle d'or, il est possible de constater que l'évolution de la création des pétales (en bleu sur la figure II.2) donne un résultat naturel.

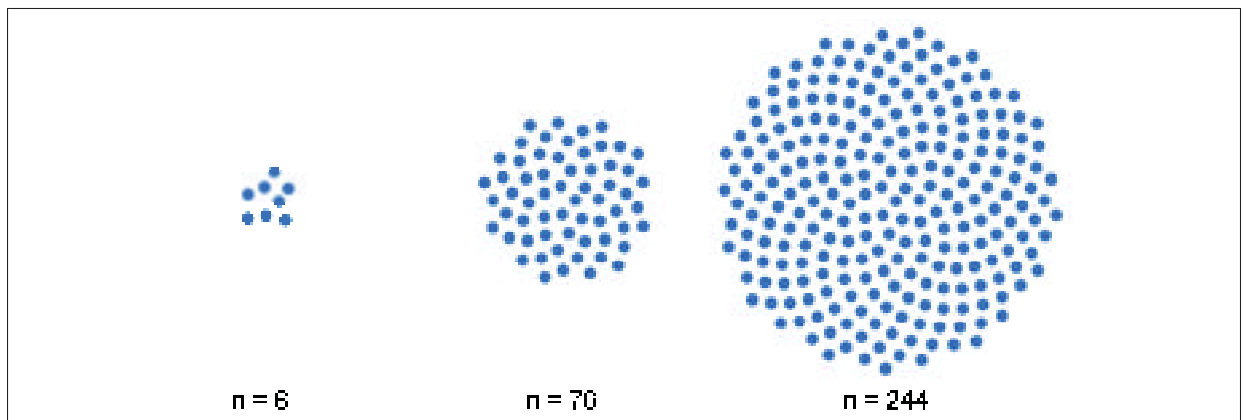


Figure II.2 Utilisation de l'angle d'or.

## LISTE DE RÉFÉRENCES

- Dorsey, J., Hans K hling Pedersen, et Pat Hanrahan, 1996. Flow and changes in appearance. *Proc. of 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH '96, pages 411–420. ACM.
- Fournier, P., Arash Habibi, et Pierre Poulin, 1998. Simulating the flow of liquid droplets. *Proc. Graphics Interface 98*, pages 133–42. Canadian Inf. Process. Soc.
- Gibou, F., Ronald Fedkiw, Russel Caflisch, et Stanley Osher, 2003. A level set approach for the numerical simulation of dendritic growth. *J. Sci. Comput.*, vol. 19, pages 183–199.
- Kharitonsky, D. et Jakob Gonczarowski, February 1993. A physically based model for icicle growth. *The Visual Computer.*, vol. 10, pages 88–100.
- Kim, T. et Ming C. Lin, 2003. Visual simulation of ice crystal growth. *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, SCA '03, pages 86–97. Eurographics Association.
- Kim, T., Michael Henson, et Ming C. Lin, 2004a. A hybrid algorithm for modeling ice formation. *Proc. of ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, SCA '04, pages 305–314. Eurographics Association.
- Kim, T., Michael Henson, et Ming C. Lin, 2004b. A physically based model of ice. *ACM SIGGRAPH 2004 Sketches*, SIGGRAPH '04, pages 13–, New York, NY, USA, 2004b. ACM.
- Kim, T., David Adalsteinsson, et Ming C. Lin, 2006. Modeling ice dynamics as a thin-film stefan problem. *Proc. of ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, SCA '06, pages 167–176. Eurographics Association.
- Maeno, N., L. Makkonen, K. Nishimura, K. Kosugi, et T. Takahashi, 1994. Growth rates of icicles. *Journal of Glaciology*, vol. 40, pages 319–326.
- Makkonen, L., 1988. A model of icicle growth. *Journal of Glaciology*, vol. 34, pages 64–70.
- Matsumura, M. et Reiji Tsuruno, 2005. Visual simulation of melting ice considering the natural convection. *ACM SIGGRAPH 2005 Sketches*, SIGGRAPH '05, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- Prusinkiewicz, P. et Aristid Lindenmayer, 1990. *The algorithmic beauty of plants*. Springer-Verlag New York, Inc., New York, NY, USA.
- Short, M. B., J. C. Baygents, J. W. Beck, D. A. Stone, et R. E. Goldstein, 2005. Stalactite growth as a free-boundary problem : A geometric law and its platonic ideal. *Physical Review Letters* 94, vol. 1, pages 1–4.

- Szilder, K. et E. Lozowski, 1994. An analytical model of icicle growth. *Annals of Glaciology*, vol. 19, pages 141–145.
- Tirmizi, S. H. et W. N. Gill, 1987. Effect of natural convection on growth velocity and morphology of dendritic ice crystals. *Journal of Crystal Growth*, vol. 85, pages 488–502.
- Tong, R., Kazufumi Kaneda, et Hideo Yamashita, 2002. A volume-preserving approach for modeling and animating water flows generated by metaballs. *The Visual Computer*, vol. 18, pages 469–480.
- Wang, H., Peter J. Mucha, et Greg Turk, July 2005. Water drops on surfaces. *ACM Trans. Graph.*, vol. 24, pages 921–929.
- Wyvill, G., Craig McPheeters, et Brian Wyvill, 1986. Data structure for soft objects. *The Visual Computer*, vol. 2, pages 227–234. ISSN 0178-2789.
- Yu, Y.-J., Ho-Youl Jung, et Hwan-Gue Cho, 1999. A new water droplet model using metaball in the gravitational field. *Computers and Graphics*, vol. 23, pages 213–222.