

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider – BISKRA
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département d'Informatique



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en informatique

Option: Data Mining et Multimédia

Intitulé :

Simulation réaliste et temps réel de nuages

Présenté Par :

Mr. SASSI Abdessamed

Devant le jury composé de :

- | | | |
|----------------------------------|----------------------|------------|
| - Dr. CHERIF Foudil | Université de Biskra | Président |
| - Pr. DJEDI Noureddine | Université de Biskra | Rapporteur |
| - Dr. BABAHENINI Mohamed Chaouki | Université de Biskra | Examineur |
| - Dr. BACHIR Abdelmalik | Université de Biskra | Examineur |
| - Dr. MELKMI Kamal Eddine | Université de Biskra | Examineur |

Année Universitaire 2013/2014

Dédicaces

À

mes chers parents,

ma femme,

ma petite fille Alae Erahmane,

mes frères et sœurs,

mes enseignants,

et tous mes amis,

je dédie ce modeste travail

Remerciements

Je tiens premièrement à prosterner remerciant Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail.

Je remercie ensuite mon encadreur Prof. Djedi NourEddine pour m'avoir honoré par son encadrement, ses idées, ses remarques, ses conseils précieux et son savoir-faire qu'il m'a transmis pendant la durée de ce mémoire. J'ai apprécié sa disponibilité et son dévouement, ainsi que son soutien,

Je remercie chaleureusement Monsieur le Docteur Foudil Cherif pour m'avoir donné le grand honneur de présider ce jury.

Mes remerciements vont également aux membres de jury : Dr. Babahenini Mouhamed Chaouki, Dr. BACHIR Abdelmalik, Dr. Melkmi Kamal Eddine pour le temps et l'effort qu'ils ont fournis pour lire et évaluer ce travail.

Un grand merci va également à tous les membres de ma famille, mes amis et mes collègues de m'avoir aidé et soutenu.

Pour terminer, je remercie tous ce qui ont participé de près ou de loin par leurs conseils, leurs encouragements ou leur amitié, à l'aboutissement de ce modeste travail.

Résumé

De nos jours, les images de synthèse sont omniprésentes dans notre quotidien. Le niveau de réalisme attendu de ces images a augmenté considérablement, et il n'est souvent pas aisé de distinguer la réalité de la virtualité, cette réalité faite et enrichie par toute la complexité des phénomènes naturels qui nous entourent.

La simulation de ces phénomènes occupe une place importante en synthèse d'images. Elle permet d'améliorer le réalisme des scènes représentées, en rappelant à l'observateur des éléments de son environnement quotidien. Parmi ces phénomènes, le nuage est l'un des plus courants dans la nature.

Les nuages ont ceci de particulier qu'elles sont très vastes possèdent une très grande complexité visuelle, ce qui fait de leur synthèse un défi pour ceux qui s'y attellent, et pire encore dans le cas temps-réel.

Dans ce mémoire, nous présentons une approche pour le rendu de nuages cumulus à la fois réalistes et rapides.

Nous choisissons une méthodologie s'appuyant sur des approches phénoménologiques pour simuler ces objets. Nous commençons par étudier les nuages du point de vue d'un observateur humain, ce qui nous permet d'identifier les éléments visuels importants caractérisant les nuages, les cumulus en particulier. Puis nous tentons de reproduire ces éléments visuels de la façon la plus efficace possible de manière à obtenir un rendu temps-réel ayant le plus de réalisme possible.

Mots clés : Rendu réaliste, illumination, nuage, cumulus.

ملخص

في الوقت الحاضر، الصور المركبة او المصنعة موجودة في كل مكان في حياتنا اليومية. المستوى المنتظر من واقعية هذه الصور تزداد بشكل ملحوظ، وغالبا لا يكون من السهل تمييز الحقيقة من الخيال، هذه الحقيقة غنية بكل تعقيدات الظواهر الطبيعية التي تحيط بنا.

محاكاة هذه الظواهر يلعب دورا هاما في رسومات الحاسوب. وهو يسمح بتحسين واقعية العروض الممثلة، إذ نذكر المشاهد بعناصر من بيئته اليومية. ومن بين هذه الظواهر، السحابة هي واحدة من الاكثر شيوعا في الطبيعة. السحب هي فريدة من نوعها فهي شاسعة جدا و لديها تعقيدات بصرية كبيرة جدا، الأمر الذي يجعل تركيبها تحديا بالنسبة لأولئك الذين يستخدمونها، وأسوأ من ذلك في حالة في الوقت الحقيقي.

في هذه المذكرة، نقدم منهج لعرض السحب الركامية بطريقة واقعية وسريعة في نفس الوقت. نختار منهجية تعتمد على مناهج ظواهرية لمحاكاة هذه الكائنات. نبدأ بدراسة السحب من خلال وجهة نظر مراقبة و ملاحظة الإنسان، هذا يتيح لنا التعرف على العناصر البصرية الرئيسية التي تميز السحب، السحب الركامية على وجه الخصوص. ثم نحاول إعادة إنتاج العناصر البصرية بأنجع وسيلة ممكنة للحصول على عرض وقت حقيقي مع أعلى مستوى ممكن من الواقعية.

الكلمات المفتاحية : عرض واقعي، إضاءة، سحب، سحابة ركامية.

Abstract

Nowadays, computer generated images are very present in our everyday life. The expected level of realism of these images has increased considerably, and it isn't often easy to distinguish the reality of the virtuality, this reality made by all the complexity of the natural phenomena which surround us.

The simulation of these phenomena is an important topic in computer graphics. It helps improving realism of displayed scenes, reminding the observer of elements from his daily environment. Amongst these phenomena, cloud is one of the most frequent in the nature.

The clouds have a very large high visual complexity, which makes their synthesis a challenge for those who are harnessed, and worse in real-time case.

We present, in this manuscript, an approach for rendering cumulus clouds that is both realistic and fast.

We choose a methodology based on phenomenological approaches to simulate these objects. We start by studying the clouds from the point of view of a human observer, which allows us to identify the important visual elements characterizing the clouds, the cumulus clouds in particular. Then we try to reproduce these visual elements in the most efficient way possible in a manner to obtain a real-time rendering with the highest possible realism.

Key words: Realistic rendering, illumination, cloud, cumulus.

Publications et Communications

Notre travail a fait l'objet d'une publication et 3 communications :

Publications

1. Sassi Abdessamed, Djedi Noureddine, Sassi Amina. Real-time realistic illumination and rendering of cumulus clouds. *International journal of Multimedia & Its Applications IJMA*, Vol. 5, No. 5, pp. 29-44, October 2013.

Communications

1. Sassi Abdessamed, Djedi Noureddine, Sassi Amina. A Simple, Efficient Method for Realistic rendering of clouds. *2nd Conference on Theoretical and Applicative Aspects of Computer Science CTAACS 2013*, Skikda, Algeria, 25-26 November 2013.
2. Sassi Abdessamed, Djedi Noureddine, Sassi Amina. Realistic rendering of cumulus clouds. *2nd International Conference on Software Engineering and New Technologies ICSENT 2013*, Hammamet, Tunisia, 21-23 December 2013.
3. Sassi Abdessamed, Djedi Noureddine, Sassi Amina. Interactive rendering of realistic Clouds. *International Congress on Telecommunication and Applications ICTA 2014*, Bejaia, Algeria, 23-24 April 2014.

Table des matières

Table des matières	I
Liste des figures	V
1 Introduction générale	1
1.1 Motivations.....	2
1.2 Objectifs	3
1.3 Problématique.....	4
1.3.1 Travail d'Antoine Bouthors.....	4
1.3.2 Travail de Magister	5
1.4 Temps réel	5
1.5 Réalisme	5
1.5.1 Définition.....	5
1.5.2 Mesure	6
1.6 Méthodologie	8
1.6.1 La méthodologie physique	8
1.6.2 La méthodologie phénoménologique	9
1.7 Structure du Rapport	10
2 Simulations de phénomènes naturels	11
2.1 Introduction	12
2.2 Modélisation et représentation des phénomènes naturels.....	12
2.2.1 Le terrain	12
2.2.2 Les végétaux et les reliefs.....	13
2.2.3 L'eau	14
2.2.4 Le feu et la flamme.....	15
2.2.5 La fumée.....	16
2.2.6 Pluie et neige	17
2.2.7 Les phénomènes gazeux	18
2.3 Conclusion.....	19

3	Les caractéristiques visuelles des nuages	20
3.1	Introduction	21
3.2	Quelle est la forme d'un nuage ?	21
3.2.1	Bords d'un nuage	21
3.2.2	Types de nuages	22
3.3	Quelle est la couleur d'un nuage ?	24
3.3.1	La lumière du soleil	24
3.3.2	La lumière du ciel	24
3.3.3	La lumière du sol	24
3.3.4	Autres types de nuages	25
3.3.5	Apparence des nuages durant la nuit	25
3.4	Caractéristiques des cumulus	26
3.4.1	Caractéristiques de la forme	26
3.4.2	Caractéristiques visuelles	27
3.5	Conclusion	28
4	Les concepts liés à la simulations et aux rendu des interactions lumineuses	29
4.1	Généralités	30
4.1.1	Dispersion atmosphérique	30
4.1.2	Réflexions	31
4.2	Définitions des concepts clefs liés aux transferts radiatifs	31
4.2.1	La Radiance	32
4.2.2	L'Irradiance	32
4.2.3	L'Intensité lumineuse	33
4.2.4	Contact avec un Corps	33
4.2.5	Coefficient d'absorption, de dispersion et d'extinction d'une molécule	34
4.2.6	Profondeur optique	35
4.2.7	La Fonction de Phase	35
4.2.8	L'Albédo	36
4.2.9	La transmittance	36
4.2.10	L'atténuation	36
4.3	Interactions lumineuses dans les nuages	37
4.3.1	Les Nuages	37
4.3.2	La Fonction de Phase et La Dispersion de Mie	37
4.3.3	Transparence	42

4.3.4	L'influence des Nuages sur le Sol et l'inverse	43
4.4	L'Atmosphère terrestre.....	44
4.4.1	Modèle simplifié pour modéliser l'atmosphère.....	44
4.4.2	Densité et pression de l'atmosphère	45
4.4.3	Dispersion de Rayleigh.....	45
4.5	Équation du transport de la lumière.....	46
4.5.1	Réflexion sur un support solide.....	47
4.5.2	Diffusion dans un milieu particulaire	48
4.5.3	Le Calcul de Radiosité	49
4.5.4	Transmittance ou facteur d'extinction.....	49
4.5.5	Lumière directe du soleil.....	50
4.5.6	Lumière indirecte du ciel.....	50
4.6	Conclusion.....	51
5	le rendu des nuages (état de l'art)	52
5.1	Modélisation de la forme.....	53
5.2	Rendu du nuage.....	57
5.3	Rendu de l'atmosphère et du ciel	68
5.1.1	Prise en compte de la dispersion atmosphérique	69
5.1.2	Temps clair ensoleillé.....	69
5.1.3	Le crépuscule.....	70
5.1.4	Calcul de la contribution directe du ciel.....	70
6	Conception	71
6.1	Modélisation de la forme.....	72
6.1.1	Idée générale.....	72
6.1.2	Notre représentation	73
6.2	Rendu	73
6.2.1	L'illumination de base.....	74
6.2.2	La corolle du nuage	84
6.2.3	Les pièges à lumière	88
6.2.4	L'ombrage	89

7 Résultats & Conclusion	91
7.1 Résultats	92
7.2 Vitesse et qualité de rendu.....	98
7.3 Etude comparative.....	99
7.3.1 Représentation de la forme.....	99
7.3.2 Génération de la forme	100
7.3.3 Méthode de rendu.....	101
7.3.4 Bilan	101
7.4 Conclusion et Perspectives.....	103
7.4.1 Conclusion.....	103
7.4.2 Perspectives	103
Bibliographie	105

Liste des figures

Figure 1.1 – Un vrai nuage de type Cumulus. C'est le genre d'image que nous cherchons à générer.....	3
Figure 1.2 – Résultats des solutions de rendu de nuages de Bouthors et al. Une image issue de "Rendu réaliste de nuages en temps réel" [Bou04].	4
Figure 1.3 – Photo d'un nuage Mammatus. Est-ce réaliste ou irréaliste ?	7
Figure 2.1 – éclairage indirect du terrain.....	13
Figure 2.2 – Eau modélisée par champs de hauteur.	15
Figure 2.3 – Construction d'une flamme.....	16
Figure 2.4 – Fumée d'une cheminée.....	17
Figure 3.1 – Un nuage très abstrait.....	21
Figure 3.2 – Certains aspects clés pour les bords d'un nuage.....	22
Figure 3.3 – Types de nuages communs.	23
Figure 3.4 – Gauche : photos des nuages. Droite : les mêmes photos avec amélioration de la saturation de couleurs. Notons comment les nuages montrent les teintes bleues et vertes.	25
Figure 3.5 – Effets de la terre sur les couleurs d'un nuage.	26
Figure 3.6 – Un fond plat d'un vrai cumulus.	27
Figure 3.7 – Un vrai cumulus illuminé par l'arrière. Notons la différence entre le corps du nuage, sombre, et la corolle, transmettant la lumière.....	28
Figure 4.1 – Illustrations des transferts radiatifs.	31
Figure 4.2 – Illustration du calcul de l'irradiance.	32
Figure 4.3 – Notion physique d'intensité lumineuse.....	33
Figure 4.4 – L'Absorption.....	33
Figure 4.5 – L'Émission.....	34
Figure 4.6 – Fonction de phase de Mie.	39
Figure 4.7 – <i>Graphe logarithmique de fonctions de phases couramment utilisées</i>	40
Figure 4.8 – différents ordres de scattering dans un nuage.	41
Figure 4.9 – <i>Une gloire et un arc blanc</i> [BB09].	42
Figure 4.10 – L'effet "Silver Lining": les bords et les parties fines de nuages sont beaucoup plus lumineux que leur cœur quand on regarde vers le soleil.	42
Figure 4.11 – Influence des Nuages sur l'Illumination de la Terre.....	43
Figure 4.12 – Fonction de phase de Rayleigh.	46
Figure 4.13 – Réflexion sur un support solide.	47
Figure 4.14 – Volume cylindrique infinitésimal.	48
Figure 4.15 – Dispersion entrante, sortante et absorption pour 1 rayon.....	49
Figure 4.16 – Diffusion de la lumière du soleil par une couche nuageuse.....	50
Figure 5.1 – Des nuages générés par Harris et al. « Rendu temps réel ».	53
Figure 5.2 – Nuages simulés avec des automates cellulaires (gauche) ou coupled map lattice (droite).	54
Figure 5.3 – Des nuages générés par Joseph Simons.	55
Figure 5.4 – Un cumulus généré par Gardner (un nuage formé par un ensemble d'ellipsoïdes fractals) « Rendu non temps-réel ».....	55
Figure 5.5 – Des nuages générés par Ebert et al « Rendu non temps-réel ».	55
Figure 5.6 – Des nuages générés par Nishita et al, nuages sous différentes conditions d'éclairage. ...	56
Figure 5.7 – Un nuage cumulus généré par Bouthors <i>et al.</i>	56

Figure 5.8 – la géométrie des nuages.	57
Figure 5.9 – modèle de nuage.	58
Figure 5.10 – nuage généré par Kajiya et al.	59
Figure 5.11 – modèle de Nishita pour le rendu de nuages. Les contributions du soleil, du ciel.	60
Figure 5.12 – différents types de chemins lumineux dans les milieux participants, apportés par différents ordres de dispersions.	62
Figure 5.13 – Résultats des solutions de rendu de nuage de Bouthors et al. : une image issue de Real-time realistic illumination and shading of stratiform [BNL06].	63
Figure 5.14 – Résultats des solutions de rendu de nuage de Bouthors et al. une image issue de "Interactive multiple anisotropic scattering in clouds" [BNM08].	65
Figure 5.15 – 1-scatter dans une couche uniforme de particules sphériques.	66
Figure 5.16 – 2-scatter dans une couche uniforme de particules sphériques.	66
Figure 5.17 – <i>Comparaison entre les deux Salers (nouveau en haut)</i>	67
Figure 5.18 – <i>Gloire et Arc Blanc du nouveau Shader</i>	67
Figure 5.19 – Cumulus congestus et Cirrocumulus altocumulus rendu entièrement dynamiquement 25 et 35 FPS, respectivement.	68
Figure 6.1 – Gauche : Particules du niveau 0 (niveau racine). Milieu : Particules créées sur le niveau 0. Droite : Génération du niveau 1	72
Figure 6.2 – Éléments utilisés dans le calcul de l’illumination d’un point.	74
Figure 6.3 – l’illumination d’une surface lambertienne en un point.	75
Figure 6.4 – chemins optiques pour le calcul de la couleur du ciel.	77
Figure 6.5 – Chemins optiques pour la dispersion du 2ème ordre.	78
Figure 6.6 – Rayon d’échantillonnage pour la dispersion du 2ème ordre.	82
Figure 6.7 – corolle éclairée de vrais nuages.	85
Figure 6.8 – résultat de la dispersion cumulée sur le cœur du nuage et à la corolle	86
Figure 6.9 – réflexion amplifiée dans une concavité de la surface	88
Figure 7.1 – Particules du niveau 0.	92
Figure 7.2 – Deux niveaux de hiérarchie générés sur le niveau racine de la figure 7.1 forment un nuage.	92
Figure 7.3 – Nuage avec sur-illumination des sillons	93
Figure 7.4 – Rendu du nuage avec la prise en compte de l’effet de “silver lining”	94
Figure 7.5 – Notre nuage rendu sans et avec les inter-réflexions sol-nuage.	95
Figure 7.6 – Nuage éclairé par un coucher de soleil.	95
Figure 7.7 – Quelques nuages rendus avec notre modèle final.	96
Figure 7.8 – Les différents éléments contribuant à l’image de notre nuage.	97

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Motivations

Les jeux vidéo, les simulateurs de vol et la reproduction d'effets spéciaux ont un besoin constant d'images de scènes naturelles plus réalistes. Parmi les objets qu'ils cherchent à reproduire, les nuages sont l'un des plus complexes.

Représentant une des préoccupations du domaine de la synthèse d'images, les nuages constituent depuis vingt ans l'un des défis les plus significatifs dans le domaine de la modélisation des phénomènes naturels. Ceci a fait du domaine de la simulation de phénomènes naturels l'un des domaines importants de recherche dans l'infographie. Les aspects tels que le ciel, les nuages, l'eau, le feu, la fumée, les arbres, les terrains, les scènes de désert, la neige et le brouillard jouent un rôle important pour créer des images réalistes de scènes naturelles. En particulier, les nuages sont indispensables pour créer des images réalistes des scènes naturelles, scènes extérieures, simulateurs de vol, simulateurs de vol spatial, visualisation de l'information météorologique, création de nuages réalistes à partir d'images satellites, simulation d'aperçus de la terre, la terre vue de l'espace extra-atmosphérique, le cinéma, l'art, etc.

Le rendu de toute sorte d'environnements extérieurs nécessite intrinsèquement de prendre en compte le ciel et les nuages. Même s'ils ne sont pas directement visibles, ils sont responsables de nombreuses importantes caractéristiques d'éclairage de notre environnement de vie. En outre, les méthodes traditionnelles de synthèse d'images exigent d'importantes ressources en mémoire et en calcul. En conséquence, de nouvelles approches pour la simulation des nuages doivent être élaborées. Ces approches devraient être réalistes, rapides et contrôlables.

Certains des facteurs de motivations peuvent être récapitulés comme suit :

- Les nuages sont des objets familiers dans la vie quotidienne, il est souhaitable de les simuler efficacement pour des applications, telles que le divertissement, la publicité et l'art, etc.
- Les nuages sont des éléments critiques dans le combat air-air et jouent un rôle important dans la simulation des systèmes d'armement intelligents, qui cherchent et identifient les cibles aériennes en milieux encombrés.
- La simulation de nuages réalistes serait également un outil efficace dans le domaine de la météorologie.

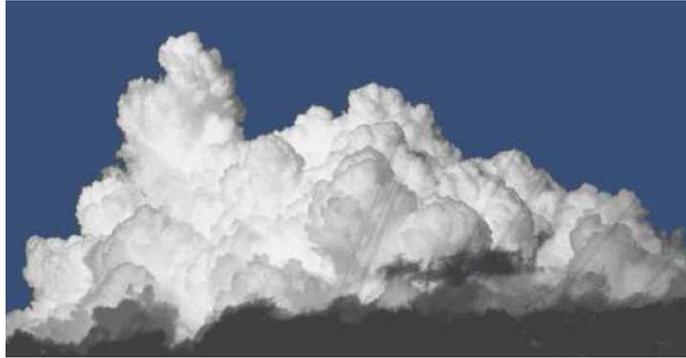


Figure 1.1 – Un vrai nuage de type Cumulus. C'est le genre d'image que nous cherchons à générer.

1.2 Objectifs

Deux problèmes principaux peuvent être définis relatifs à la simulation des nuages : simulation de leur forme (modélisation) et leur aspect (rendu). Chacun de ces problèmes en lui-même est particulièrement une tâche difficile.

Généralement, le processus de modélisation comprend la création des formes des objets, leurs dynamiques (mouvement) et de leurs propriétés physiques telles que la réflectance de la surface. Cependant, ce n'est pas une tâche facile pour les objets tels que les nuages.

Le rendu est le processus de produire des images en calculant les couleurs pour chaque Pixel, il a pour but de produire à l'écran une image réaliste en fonction de leur représentation en mémoire.

Ce mémoire se concentrera principalement sur la modélisation et le rendu de nuages cumulus. Les approches précédentes ont montré qu'il est possible d'atteindre un rendu réaliste hors ligne (rendu avec une vitesse très lente) tandis que le rendu en temps réel des nuages est encore un peu irréaliste. En particulier, ces techniques ne parviennent pas à reproduire de nuages cumulus, qui sont les plus complexes, duveteux, détaillées, contrastées, spectaculaires et visuellement attrayants. Ainsi, notre objectif principal est de concevoir une méthode capable d'atteindre un rendu temps réel et réaliste de nuages type cumulus similaire à ceux illustrés dans la figure 1.1.

Le critère de temps réel est défini via la vitesse du rendu. Le critère de réalisme consiste en la reproduction fidèle des caractéristiques visuelles observables dans les nuages réels.

Une méthodologie s'appuyant sur des approches phénoménologiques a été choisie pour simuler ces objets. Cette approche consiste à essayer de reproduire une série de caractéristiques macroscopiques du phénomène étudié plutôt que d'en simuler les causes microphysiques.

Nous avons donc commencé par étudier les propriétés visuelles caractéristiques des nuages, puis nous avons tenté de les reproduire de la façon la plus efficace possible de manière à obtenir un rendu temps réel ayant le plus de réalisme possible.

1.3 Problématique

Le sujet de ce travail de magistère concerne les nuages : Simulation réaliste et temps réel de nuages, élément important des scènes naturelles, et plus précisément les cumulus. Le but de ce projet de magistère est d'étudier et de proposer une solution pour un rendu temps réel et réaliste de nuages cumulus.

1.3.1 Travail d'Antoine Bouthors

Durant sa thèse dans l'équipe Evasion, Antoine Bouthors a travaillé sur le rendu et la simulation visuellement réaliste de nuages convectifs en temps réel. Sa thèse **“Rendu réaliste de nuages en temps réel”** [Bou04] traite la question relative au rendu de nuages et porte précisément sur le rendu de nuages cumulus. Elle a pu générer un rendu convaincant des nuages (voir la figure 1.2). La vitesse de rendu des images est descendue jusqu'à 0.3 images par seconde, ce qui signifie que trois secondes ont été nécessaires pour calculer chaque image. Ceci est loin d'être en temps réel.

La couleur du Ciel utilisé dans l'éclairage ambiant est supposée bleue et constante, le fond est supposé vide (pas de montagnes ni de mer...) ce qui constitue la majeure restriction de ce modèle.

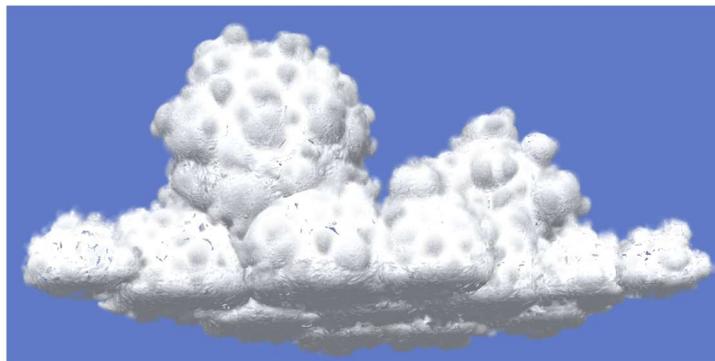


Figure 1.2 – Résultats des solutions de rendu de nuages de Bouthors et al. Une image issue de “Rendu réaliste de nuages en temps réel” [Bou04].

1.3.2 Travail de Magister

Nous nous sommes proposés d'étendre le modèle de rendu de nuages cumulus de Bouthors *et al.* [Bou04] pour prendre en compte la couleur réelle du ciel et un environnement autre qu'un fond vide (nous détaillerons notre choix dans la partie 5). Étant donné que cette méthode fait l'hypothèse d'un fond vide et un éclairage ambiant constant avec un ciel bleu, pour des raisons de simplicité. Cependant, en réalité, la couleur du ciel n'est pas simplement bleue.

Nous avons réétudié notre équation d'illumination modifiant le facteur d'éclairage ambiant qui représente la lumière ambiante, lumière provenant de toutes les directions, et nous avons utilisé un environnement décent (i.e., au sein par un paysage et un ciel réaliste) au lieu d'un fond vide.

1.4 Temps réel

En infographie, temps réel signifie généralement que l'application est capable de rendre à un taux d'au moins 30 images par seconde (FPS). Cela signifie que le calcul d'une image devrait prendre moins de 30 ms. Si le taux est inférieur à cette limite, mais c'est toujours au moins quelques images par seconde, l'application est dite «interactive».

Les applications qui s'exécutent à ces vitesses peuvent évoluer vers le temps réel, soit par l'augmentation de la puissance de calcul du matériel, soit par application d'autres optimisations.

Les vitesses plus lentes sont appelées 'hors ligne'. En particulier, les effets visuels générés par ordinateur nécessitent parfois un temps de calcul de plusieurs heures par image pouvant être compensé par une solution de calcul massif. Même une forte augmentation de la puissance de calcul ne permettrait pas des méthodes hors ligne pour devenir en temps réel.

1.5 Réalisme

1.5.1 Définition

Le problème du concept de «réaliste» est qu'il n'y a pas de définition standard pour elle en synthèse d'images. Ferwerda a fait des efforts pour clarifier ce problème et a proposé plusieurs définitions pour le concept.

La première définition est le **réalisme physique** qui consiste à reproduire la simulation visuelle exacte d'un œil humain recevrait dans une scène réelle, i.e., le même champ de luminance, avec une résolution correspondant à celle de l'œil (réalisme physique).

Toutefois, cela n'est pas possible principalement parce que les écrans d'ordinateur ne sont pas capables de reproduire les plages de fréquences élevées de luminance que nous voyons dans la réalité. En outre, et peut-être le plus important, la vision humaine à certaines limites (exemples ci-dessous). En conséquence, le réalisme nous visons est **photoréalisme**, i.e., pour produire des images qui déclenchent la même réponse visuelle que la scène réelle, même si le champ de luminance est différent (photoréalisme).

A titre d'exemple de la limitation de la vision : l'œil humain n'est pas sensible à certaines parties du spectre de la lumière comme l'infrarouge et l'ultraviolet. Cela nous permet d'ignorer ces spectres (i.e., ne les calculer pas). En faisant cela, nous pouvons gagner du temps de calcul et optimiser nos algorithmes pour le spectre visible.

Un autre exemple est que si la lumière est trop intense, l'œil devient saturé et ne voit pas les variations de luminosité. Ainsi, il ne serait pas nécessaire de calculer ces variations très fidèlement [Bou08].

1.5.2 Mesure

La principale limitation du critère de photoréalisme est qu'il est très difficile d'avoir une bonne mesure de celui-ci. Nous ne voulons pas de comparer le champ de luminance résultante avec un cas réel, nous voulons comparer la réponse visuelle résultante, qui est situé quelque part inconnue dans le cerveau humain.

Il existe un petit nombre de métriques perceptuelles de réalisme mais ils sont encore très bas niveau, i.e., ils peuvent dire si deux images seront considérées comme indiscernables, mais ils ne sont pas capable de donner des réponses telles que " Cette image ressemble comme étant l'image d'un nuage", qui est idéalement le genre de mesure que nous le voudrions.

De telles approches (comparaison d'une image CG et une image de référence en utilisant des métriques perceptuelles ou des études de l'utilisateur) ont été utilisées pour les médias participants et ont prouvé leur utilité. Pour être capable d'utiliser ces approches, il faudrait tenter de reproduire un nuage existant et de comparer nos résultats avec une photographie de ce nuage. Malheureusement, les outils actuels de détection sont loin d'être exacts, rapides et assez précis pour capturer avec une haute résolution la forme du nuage 3D (y compris l'intérieur) à un moment précis.



Figure 1.3 – Photo d'un nuage Mammatus. Est-ce réaliste ou irréaliste ?

Une autre façon de mesurer ce réalisme est de faire une étude sur les utilisateurs, de demander à un groupe de personnes de décider si les nuages qui leur sont présentés sont réalistes ou non. Cela pose de nombreuses questions. Une image peut être jugée irréaliste juste parce que l'environnement des nuages n'est pas réaliste, ou parce que la forme du nuage elle-même semble irréaliste même si le calcul de transport de la lumière est exact. Après tout, même quelques nuages réels apparaissent irréalistes (voir Figure 1.3). Selon les personnes interrogées, la réponse sera différente. Un météorologiste considérerait un nuage irréaliste tout simplement parce qu'il ne s'adapte pas avec les conditions météorologiques environnantes, quelle que soit la qualité du rendu. Un artiste s'inquiéterait plus de l'aspect esthétique de l'image que toute autre chose. Un utilisateur du jeu vidéo pourrait trouver les nuages de son jeu préféré plus réalistes que de vrais nuages [Bou08].

En conséquence, afin d'avoir une mesure aussi objective que possible, nous choisissons le critère qualitatif suivant :

Dans une première étape, nous étudions les nuages réels et identifions les caractéristiques visuelles qui sont communes aux nuages. Notre critère de réalisme est que les images que nous créons affichent ces caractéristiques visuelles. En utilisant cette approche, nous inspirons à partir des images réelles du nuage et nous comparons nos résultats à des images réelles de nuages. Évidemment, sa difficulté se trouve en identifiant clairement toutes les caractéristiques visuelles des nuages.

1.6 Méthodologie

La recherche en infographie suit généralement deux approches différentes : l'approche physique et l'approche phénoménologique.

1.6.1 La méthodologie physique

L'approche physique consiste à reproduire les lois locales de la physique d'une manière de calcul efficace et les utiliser pour rendre une image.

L'approche phénoménologique utilise plutôt une approche inverse. Elle consiste à trouver un modèle de calcul capable de reproduire un phénomène observé, indépendamment de la physique fondamentale qui en est la cause.

Les avantages de l'approche physique résident dans le fait qu'elle s'appuie sur de nombreux travaux et études sur la matière. Il y a à signaler, cependant, de nombreux pièges.

Tout d'abord, les lois de la physique sont elles-mêmes des approximations des phénomènes réels qui correspondent aux cas idéaux. À titre d'exemple, les systèmes d'optique géométrique supposent que les objets sont beaucoup plus grandes que la longueur d'onde de la lumière et échouer ainsi complètement à déterminer l'optique d'une gouttelette de nuage.

Deuxièmement, ces lois physiques reposent sur des conditions aux limites, conditions initiales et de nombreux paramètres, qui sont généralement très complexes dans des cas réels s'ils ne sont pas connus. Par conséquent, une méthode qui reproduit très fidèlement les lois de la physique, mais repose sur des conditions aux limites simplifiées est susceptible de donner de mauvais résultats.

Troisièmement, le critère utilisé pour mesurer le réalisme est très souvent une mesure quantitative (par exemple, une erreur des moindres carrés) qui ne tient pas compte des conséquences perceptives. Enfin, il est difficile pour un être humain de prédire les résultats d'une méthode s'appuyant sur de multiples paramètres microphysiques tandis qu'un artiste a besoin des paramètres compréhensibles significatifs.

En conséquence, il est très facile d'être aveuglé par l'illusion de réalisme théorique lors de l'utilisation de l'approche physique. En seulement se soucier de savoir si les équations de la physique sont correctement calculées.

Le problème ici est très difficile d'obtenir des vitesses temps réel en utilisant cette approche. En effet, l'approche physique consiste généralement à des équations différentielles partielles décrivant un comportement à l'échelle microscopique. Ces équations nécessitent généralement des méthodes de calcul lentes à résoudre. Notez qu'il existe des lois physiques décrivant les phénomènes d'une manière plus macroscopique ou mésoscopique. Ce genre de descriptions peut conduire à des modèles de calcul plus efficace.

1.6.2 La méthodologie phénoménologique

Les méthodes phénoménologiques prennent la démarche inverse, qui est de viser à une sortie spécifique, indépendamment des modèles génératifs microphysiques. L'objectif est de reproduire le phénomène, et non pas les mécanismes sous-jacents qui en sont la cause. Le premier inconvénient de cette méthode est que le phénomène le plus complexe est le plus difficile à analyser et reproduire. Deuxièmement, il n'existe pas actuellement des critères suffisamment sains pour la qualité du résultat. Troisièmement, cette stratégie inductive est également celle utilisée par des physiciens pour établir les équations (le résultat de siècles de recherches). Ainsi, il semble improductif de commencer à partir de zéro et essayer de retrouver en quelques mois tout ce qui a été trouvé par les physiciens.

En conséquence, nous voudrions plutôt de prendre le meilleur des deux méthodes. Tout d'abord, nous utilisons les critères du réalisme qui sont basés sur les sur la perception humaine plutôt que sur des mesures quantitatives aveugles. Ces critères reposent sur l'identification des caractéristiques visuelles vus dans les nuages réels. Puis nous cherchons de les reproduire de la façon la plus efficace possible de manière à obtenir un rendu temps réel ayant le plus de réalisme possible.

Le but de ce mémoire est de concevoir une méthode capable de rendre des nuages cumulus réalistes en temps réel. Le critère du temps réel est défini via la vitesse de rendu. Le critère du réalisme consiste en la reproduction fidèle des caractéristiques visuelles observables dans les nuages réels. Afin d'atteindre ce but nous utilisons une méthodologie s'appuyant sur des approches phénoménologique. Cette approche consiste à essayer de reproduire une série de caractéristiques macroscopiques du phénomène étudié plutôt que d'en simuler les causes microphysiques.

1.7 Structure du Rapport

La suite du document est divisée en 5 parties.

La première partie fait une présentation générale sur la modélisation de la plupart des phénomènes naturels qui ont reçu beaucoup d'attention dans le domaine de l'infographie tels que la simulation de pluie, de la neige, des terrains, des végétaux et des reliefs, de l'eau, du feu, de la fumée, et des phénomènes gazeux ...etc.

Ensuite, nous allons étudier les nuages du point de vue d'un observateur humain, ce qui nous permet d'identifier les éléments visuels importants caractérisant les nuages. Ces éléments visuels sont ceux que nous cherchons à reproduire dans un but de réalisme.

Dans la troisième partie de ce mémoire, nous allons présenter les notions de base de la physique nécessaires à la compréhension du présent rapport. Dans une première section, nous allons introduire les généralités des transferts radiatifs régissant le transport de la lumière du soleil dans une scène d'extérieur. Puis dans une deuxième section, nous allons définir les termes qu'il est indispensable de connaître. Nous aborderons ensuite les modèles physiques de représentation des interactions lumineuses dans les nuages et dans l'atmosphère pour arriver à exprimer l'équation régissant les transferts radiatifs dans une scène d'extérieur.

La quatrième partie constitue un état de l'art dans lequel nous exposons quelques travaux sur la modélisation et le rendu de nuages.

Dans la cinquième partie, nous présentons un modèle de forme et d'illumination permettant le rendu réaliste temps réel de nuages cumulus.

Pour finir, nous présentons nos résultats, puis nous comparons notre modèle à des modèles existants. Pour clore notre rapport, nous donnons des pistes quant au travail de recherche possible sur le rendu, l'animation et la modélisation de nuage.

Chapitre 2

Simulations de phénomènes naturels

2.1 Introduction

Dans le domaine de la synthèse d'images, on est toujours à la recherche de nouvelles techniques pour obtenir des images de plus en plus proches de la réalité. Il est donc naturel de vouloir représenter de façon très proche les phénomènes naturels puisqu'ils sont omniprésents dans notre environnement.

Les phénomènes naturels jouent un rôle essentiel dans notre vie quotidienne. La plupart du temps, ils sont visibles à l'œil nu et comprennent une série de phénomènes très divers dont les plus connus sont ceux auxquels on a affaire le plus souvent dans notre vie quotidienne : le brouillard matinal, l'évolution des nuages, la fumée et le feu...

La géométrie et les mouvements complexes de ces phénomènes les rendent très difficiles à modéliser. Certains phénomènes naturels, comme les montagnes, les arbres et les plantes ont des formes rigides complexes, tandis que d'autres, tels que les nuages, le feu et l'eau ont des formes amorphes complexes.

Ainsi, il va de soi que lorsqu'on veut recréer une scène quelconque à l'aide de l'ordinateur, il est essentiel que les phénomènes naturels soient pris en compte. La création synthétique de ces phénomènes est donc très intéressante, surtout dans des domaines spectaculaires tels que le cinéma ou la télévision.

En conséquence, dans le domaine de la synthèse d'images, le développement d'un modèle de phénomènes naturels convaincant est devenu l'un des problèmes les plus attractifs. Cependant, la plupart des modèles existants ne concernent que les phénomènes les plus courants compte tenu de la diversité et de la complexité de ces phénomènes. En effet, vu l'ubiquité de ces derniers, il y a depuis quelques années, un intérêt croissant pour reproduire de façon plus précise les phénomènes naturels et leurs comportements dans le but de générer des images de plus en plus réalistes.

2.2 Modélisation et représentation des phénomènes naturels

2.2.1 Le terrain

La modélisation des terrains est un aspect très important dans plusieurs applications tels que la géographie, les jeux vidéo, les simulateurs de vols, l'aménagement du territoire, etc.

La complexité de modélisation et représentation des terrains provient de deux aspects essentiels, le premier aspect concerne les modèles de la génération et l'amplification des données qui définissent le terrain, et le deuxième est les techniques adéquates pour le rendu de ses modèles.

La plupart des approches de modélisation du terrain ont utilisé une approche de modélisation fractale. Les travaux récents ont inclus la modélisation de terrains avec des fractales et puis simulé les processus naturels d'érosion qui affectent le terrain pour créer un modèle plus réaliste [Moh05].

Dans le cas de terrains 3D (montagnes, canyons, aménagements urbains...), l'éclairage indirect est primordial au réalisme de la scène. Par exemple, les inter-réflexions sol-sol ou sol-nuage permettent une diffusion de la lumière dans des zones qui ne reçoivent pas de lumière directe du soleil. L'atmosphère joue aussi un rôle considérable, puisqu'elle absorbe et diffuse une partie de la lumière du soleil [Vid08].

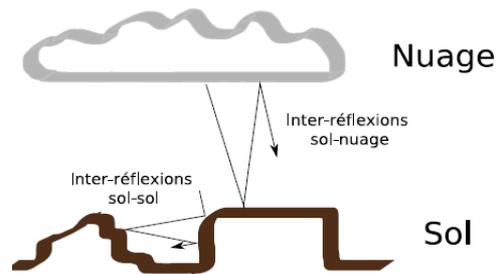


Figure 2.1 – éclairage indirect du terrain.

Il existe deux approches générales pour le rendu temps réel de terrains 3D. Une première consiste à faire le maximum de pré-calculs et de rendre en temps interactif des images d'une grande qualité. La seconde consiste à utiliser des modèles analytiques "approximatifs", qui permettent de rendre des effets lumineux complexes sans pour autant nécessiter beaucoup de mémoire.

Malgré les problèmes qui se posent encore, la création et le rendu de terrain sont des domaines qui ont été beaucoup étudiés et les solutions proposées aujourd'hui semblent avoir atteint un niveau convenable de souplesse et de réalisme. Des auteurs comme Musgrave étudient maintenant l'implémentation de modèles physiques pour une simulation encore plus précise de l'érosion ou pour la visualisation de l'eau. Une partie importante des recherches est également consacrée à l'optimisation de ces méthodes avec pour objectif leur utilisation dans des environnements temps réels de réalité virtuelle.

2.2.2 Les végétaux et les reliefs

La représentation et la génération des végétaux est un aspect très important dans la simulation de paysages. Ils apparaissent dans la scène sous forme d'herbe, de buissons, d'arbustes ou des arbres. Bien que certains auteurs ont proposé plusieurs modèles pour représenter les végétaux d'un paysage, aucun de ces travaux ne propose un modèle capable de reproduire la diversité de ces végétaux de manière réaliste et rapide.

On distingue essentiellement deux grandes catégories de modèles pour la synthèse d'image des végétaux [Cha97] :

2.2.2.1 Les modèles structurels

Ces modèles consistent à construire la structure des végétaux par une méthode mathématique ou algorithmique, cette structure dépend de l'espèce du végétale, puis l'interprétation de cette structure en représentation géométrique 3D, et finalement le rendu pour obtenir les images voulus.

2.2.2.2 Les modèles impressionnistes

Ce modèle concentre sur l'aspect visuel de l'image résultat, plutôt que l'aspect structurel du végétale, son objectif est de produire une image convaincante à l'observateur, sans s'occuper du réalisme de la structure. Le modèle n'est pas forcément construit dans l'espace (3D), mais peut simplement produire une image (2D). Le processus de modélisation et rendu sont en générale confondus.

Comme pour les végétaux, la modélisation et la visualisation des reliefs naturels ont toujours été un domaine actif de la recherche en synthèse d'images. Ce problème est d'autant plus étudié qu'il a de nombreuses applications en géographie, aménagement du territoire, exploration spatiale, simulateur de vol, etc. Comme pour certaines techniques de synthèse des végétaux, il existe deux aspects distincts de ce problème : d'une part la génération ou l'amplification des données qui définissent le terrain et d'autre part le rendu d'un tel modèle.

2.2.3 L'eau

L'eau est l'un des phénomènes naturels les plus importants du fait de son omniprésence dans le monde qui nous entoure. On la retrouve dans des situations très diverses et sous bien des formes, tant liquides (vagues d'océan, chutes d'eau..) que solide (neige, glace..) ou gazeuses (nuages, brouillard..). La représentation de l'eau est donc un sujet important en synthèse d'images

Sa modélisation a reçu autant d'attention que la modélisation du terrain et la végétation. Un grand nombre de recherches ont été effectuées dans la modélisation, l'ombrage, et la reproduction des effets optiques de l'eau, la plupart des méthodes présentent encore un grand fardeau de calcul pour obtenir une image réaliste. Néanmoins, il est possible d'emprunter à ces démarches et réaliser des résultats modestes.

Les premiers modèles pour la synthèse de l'eau ont utilisé des modèles cycloïdaux simples pour contrôler la hauteur de la surface de l'eau [Max81]. Ces modèles posaient de nombreux problèmes, y compris leur incapacité à simuler la rupture ou le bouclage des vagues puisqu'il peut seulement y avoir une valeur de hauteur pour chaque emplacement.

En 1986, un nombre important de chercheurs se sont intéressés à la modélisation des vagues de l'océan. Certains de ces modèles ont fourni des modèles à base physique qui a simulé des vagues déferlantes et même pulvérisées à partir de vagues déferlantes créées par des systèmes de particules [Moh05].

Plus récemment, plusieurs auteurs ont développé des modèles basés sur des équations d'ondes qui permettent même le transport net du volume d'eau. Le principal inconvénient de leur approche est qu'ils utilisent un nouveau champ de hauteur, de sorte qu'ils ne peuvent pas simuler le bris des vagues.

La dynamique du vent et des vagues peut être simulée en utilisant des modèles procéduraux et le rendu en utilisant des mailles ou des champs de hauteur.

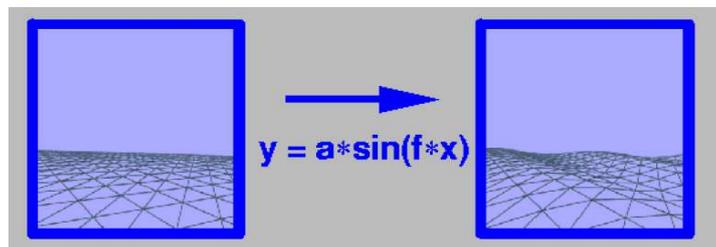


Figure 2.2 – Eau modélisée par champs de hauteur.

La géométrie peut être texturée en utilisant des simples images de textures procédurales. La technique de Bump Mapping peut être utilisée pour créer l'illusion d'ondulations sans les modeler dans la géométrie. Le Bump Mapping peut être animé en tant qu'élément de la simulation pour animer les ondulations.

Les petits bosses peuvent être modélisés à l'aide d'un champ de hauteur mappé de texture. La hauteur des sommets peut être modulée avec une sinusoïde pour simuler les ondes simples comme l'illustre la figure 2.2. La fréquence et l'amplitude des ondes peuvent être variées pour réaliser des effets différents. La phase de la sinusoïde peut être variée au cours du temps pour créer un mouvement ondulatoire.

2.2.4 Le feu et la flamme

La modélisation du feu a reçu très peu d'attention comparée à la modélisation de l'eau. Et malgré de très nombreuses études, le fonctionnement physico-chimique du feu n'est pas complètement élucidé. C'est un phénomène complexe dont certains processus ne sont pas bien connus (formation des suies, flammes fantômes, etc.). Cette complexité se retrouve alors tout naturellement dans les simulations de propagation d'incendie. La principale approche de modélisation du feu a été l'utilisation de systèmes de particules.

L'approche par automates cellulaires peut s'avérer efficace dans certaines configurations mais elle nécessite non seulement une bonne définition des règles de propagation mais aussi des essais pour affiner une prédiction basée sur des probabilités.

Le rendu de flammes en synthèse d'images est un sujet de recherche actif depuis de nombreuses années. Il intéresse particulièrement l'industrie du cinéma, l'industrie du jeu vidéo ou les concepteurs d'environnements virtuels au sens large, par exemple pour la reconstruction de sites archéologiques. Pour autant, les besoins sont différents et engendrent donc des réponses distinctes. Comme bien souvent dans le domaine, la priorité peut en effet être donnée au réalisme ou à la rapidité d'exécution.

Dans la littérature, les premiers modèles de flammes sont apparus dans les années 1990, d'abord pour décrire des flammes laminaires simples statiques, puis dynamiques. Des équations de diffusion furent utilisées pour générer des feux turbulents, mais la simulation impliquait un paramétrage assez difficile. Le désavantage évident de toutes ces méthodes est le coût induit par les calculs physiques.



Figure 2.3 – Construction d'une flamme.

Bien que la demande de simulations du comportement des fluides pour les effets spéciaux est une réalité, les effets de feu sont particulièrement encore davantage demandés en raison de la nature dangereuse de ce phénomène. Les simulations du feu sont également utilisées pour les effets de la réalité virtuelle.

2.2.5 La fumée

La modélisation des phénomènes naturels tels que la fumée reste un problème difficile dans l'infographie. Ce n'est pas surprenant puisque le mouvement du gaz est très complexe et turbulent, et sa représentation nécessite une résolution des équations différentielles très coûteuse en temps de calcul. Elle nécessite potentiellement l'exploitation de concepts physiques sophistiqués.

Les simplifications possibles (moyenne, maillage adaptatif, etc.) ne permettent pas à ces modélisations une application en temps réel, mais les images étonnamment réalistes peuvent être générées en utilisant des techniques assez simples.

Les modèles visuels de fumée ont de nombreuses évidentes applications dans l'industrie CG, y compris les effets spéciaux et les jeux interactifs. Idéalement, un bon modèle de fumée en CG devrait à la fois être facile à utiliser et produire des résultats très réalistes. Évidemment, la modélisation de la fumée et du gaz est très importante par rapport aux autres domaines de l'ingénierie. Malheureusement, la plupart des modèles de fumée CG sont trop lentes.



Figure 2.4 – Fumée d'une cheminée.

2.2.6 Pluie et neige

Bien que la pluie soit certainement l'un des phénomènes météorologiques les plus courants, son rendu manque généralement de réalisme dans les applications temps-réel.

Les méthodes de rendu de pluie se répartissent en deux catégories principales. La plupart des jeux vidéos utilisent des systèmes de particules et des textures statiques, ce qui conduit à un manque certain de réalisme. D'autres méthodes se basent sur des propriétés physiques, dont le but est de simuler le comportement et l'apparence de gouttes d'eau évoluant sur une surface. Elles produisent des résultats satisfaisants, au prix de temps de calculs importants.

Visualiser une averse ou une chute de neige est un sujet très peu abordé en synthèse d'images. Certaines techniques comme les textures ou les systèmes de particules permettent en général une simulation satisfaisante de ces phénomènes. Par contre, une simulation plus précise et plus physique d'un tel effet constitue un problème difficile [Cha97].

Dans le domaine de la mécanique des fluides et de la nivologie, il existe plusieurs modèles pour la simulation du transport et du dépôt de la neige. De nombreux effets induits par la pluie et la neige sur le sol et les objets du paysage, ces effets peuvent en général soit être traités au moment de la modélisation, soit être intégrés comme paramètres du rendu des surfaces.

Nishita [NDKY00] remarque qu'un volume de neige possède des caractéristiques semblables à un milieu participatif comme celui des nuages. Il propose donc des techniques basées sur l'intégration de la diffusion multiple de la lumière pour simuler une surface enneigée.

2.2.7 Les phénomènes gazeux

Le rendu de scènes contenant des nuages, brouillard, effets de dispersion atmosphérique et autres phénomènes gazeux a reçu beaucoup d'attention dans la littérature de l'infographie. Plusieurs articles traitent principalement les effets de dispersion atmosphérique [Will87, RT87], tandis que beaucoup des travaux couvrent l'illumination de ces phénomènes gazeux en détail.

La plupart des auteurs ont utilisé un modèle de réflexion d'albédo faible [Bli82, KH84, Max86], tandis que quelques-uns [RT87], ont opté pour l'implémentation d'un modèle d'albédo élevé. Un modèle de réflectance d'albédo faible suppose que les effets de diffusion secondaires sont négligeables, alors qu'un modèle d'éclairage d'albédo élevé calcule les effets de diffusion du deuxième ordre et plus.

Un autre problème est la modélisation de la géométrie de ces gaz. Certains auteurs utilisent un milieu de densité constante, permettant cependant différentes couches de densités constantes. Cela permet une géométrie très limitée pour les gaz. Dans sa contribution [Voss83] utilise des fractales alors que [Max86] utilise des champs de hauteur pour la modélisation de la géométrie des nuages. De son côté, [KH84] a opté pour l'utilisation d'un modèle à base physique pour les nuages, qui simule la vapeur d'eau, le flux de chaleur, ... dans le but de former un modèle physique pour les nuages. Cependant, les images qui en résultent ne sont pas très réalistes. Dans son article [Gar85] utilise des ellipsoïdes creux pour modéliser la géométrie des nuages. Il contrôle la transparence des ellipsoïdes creux grâce à l'utilisation de la synthèse de Fourier. Pour former de plus grosses formations nuageuses, il combine plusieurs ellipsoïdes pour former les groupes des nuages. Le principal problème avec son approche est qu'il n'est pas un vrai modèle en trois dimensions pour les nuages, rendant la précision de l'ombrage de nuage aléatoire. Un autre problème est qu'une fois que l'on entre à l'intérieur d'un nuage, on peut clairement voir qu'il s'agit d'un objet creux simple et non pas d'un volume de nuage tridimensionnel complet.

Ebert et Parent [EP90] utilisèrent des fonctions basées sur un écoulement turbulent pour modéliser la densité d'une variété de gaz. Ces fonctions sont basées sur la simulation visuelle d'écoulement turbulent de Perlin [Per85a]. Ce modèle est un vrai tridimensionnel modèle pour la géométrie du gaz et fournit des résultats réalistes. Cette technique semble fournir des résultats plus réalistes que la plupart des efforts précédents en fournissant des rendus visuels réalistes et des animations de phénomènes gazeux et des ombres qu'elles projettent. Elle est basée sur une simulation visuelle de l'écoulement turbulent, et est donc une simulation visuelle des processus turbulents qui détermine la géométrie des phénomènes gazeux.

2.3 Conclusion

Les phénomènes naturels sont omniprésents dans notre environnement et jouent un rôle essentiel dans notre vie quotidienne, cela a fait de la simulation de divers phénomènes naturels l'un des domaines importants de recherche en infographie.

Dans ce chapitre nous avons présenté une vue générale sur la modélisation de la plupart des phénomènes naturels qui ont reçu beaucoup d'attention dans le domaine de la synthèse d'image tels que la pluie, la neige, les terrains, les végétaux, les reliefs, l'eau, le feu, la fumée, et les phénomènes gazeux.

Chapitre 3

Les caractéristiques visuelles des nuages

3.1 Introduction

Les nuages sont formés de millions de particules (des amas de molécules) d'eau sphériques s'étendant sur plusieurs kilomètres en suspension dans l'air. Ces gouttelettes d'eau proviennent de la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air. Elles ont un diamètre de l'ordre de 10^{-5} m, ce qui entraîne une dispersion de la lumière différente de la dispersion atmosphérique qui est due aux molécules de l'atmosphère.

Les nuages ont un albédo élevé (quantité de lumière renvoyée par la matière), ils réfléchissent la lumière sans l'absorber (il n'y a quasiment aucune absorption). Les gouttelettes d'eau induisent une dispersion principalement vers l'avant (forward scattering : le fait que la matière ne dévie presque pas la lumière, et la disperse donc vers l'avant plutôt que dans toutes les directions), ce qui signifie que la lumière est très peu déviée par le nuage à l'échelle microscopique.

Cette section décrit les caractéristiques visuelles les plus évidentes et les plus les triviaux que nous devons reproduire dans les nuages afin d'atteindre notre objectif de réalisme.

Pour reproduire de vrais nuages, nous devons d'abord répondre à deux questions qui nous aideront à identifier leurs caractéristiques visuelles : quelle est la forme d'un nuage, et quelle est la couleur d'un nuage [Bou08] ?

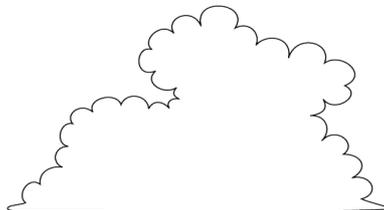


Figure 3.1 – Un nuage très abstrait.

3.2 Quelle est la forme d'un nuage ?

3.2.1 Bords d'un nuage

Comme indiqué sur la figure 3.1, un simple croquis, fait de lignes abstraites blobby est suffisant pour un être humain de le reconnaître comme un nuage. Dans ce croquis, les lignes représentent les bords et les contours du nuage. Cette information nous indique que les bords et les contours sont très importants dans la reproduction d'un nuage, et sont l'un des principaux facteurs expliquant à l'observateur qu'il regarde un nuage.

En observant ces lignes, nous avons également remarqué que leur forme est particulière. Elle est faite par des chemins courbés circulaires, avec des parties convexes lisses et des angles concaves nets. Ces formes se reproduisent l'aspect duveteux des nuages convectifs. Cette observation nous apprend que les bouffées représentent une forte caractéristique visuelle d'un nuage de convection (voir la figure 3.2 (a)).



(a) gonflé



(b) mèche



(c) lisse

Figure 3.2 – Certains aspects clés pour les bords d'un nuage.

Lorsqu'on observe de près un nuage réel, on peut voir que sa forme est en fait plus complexe qu'une simple collection de bouffées convexes. Lorsque la frontière est nette et non gonflée, il montre souvent un aspect déstructuré et chaotique. Ces tendus de nuages sont appelés mèches (voir la figure 3.2 (b)) et représentent une autre forte caractéristique visuelle des nuages. En outre, ces bouffées et mèches ont un comportement fractal. On peut voir clairement sur la figure 3.2 que l'on peut définir bouffée et mèches à différents niveaux d'échelle.

Enfin, les nuages peuvent avoir un aspect vaporeux, épais, lisse (Figure 3.2 (c)). Ainsi, les bords d'un nuage peuvent avoir trois principaux aspects distincts : soit forte et duveteux, bouclés et fins, ou douce et lisse.

3.2.2 Types de nuages

L'aspect des bords d'un nuage est fortement lié au type de nuage. Les météorologues ont classé les nuages en différents types en fonction de leur apparence.

3.2.2.1 Cumulus

Signifie que le nuage a une forme gonflée. Ces nuages affichent généralement des bords durs, notamment les bords de leur bouffée. Les autres parties des nuages (par exemple, la base et les parties ombrées) peuvent avoir un aspect vaporeux ou lisse. Son aspect bourgeonnant est, en effet, ressemblé à un chou-fleur.

3.2.2.2 Stratus

Signifie que le nuage a une forme stratiforme, ces nuages sont ceux qu'on voit en gris, ciel couvert et sont lisses. Ce n'est pas souvent possible de voir leurs bords, mais ils sont généralement doux, parfois vaporeux. Le stratus a généralement un aspect assez uniforme, et parfois il est constitué d'éléments séparés ayant un aspect déchiqueté.

3.2.2.3 Cirrus

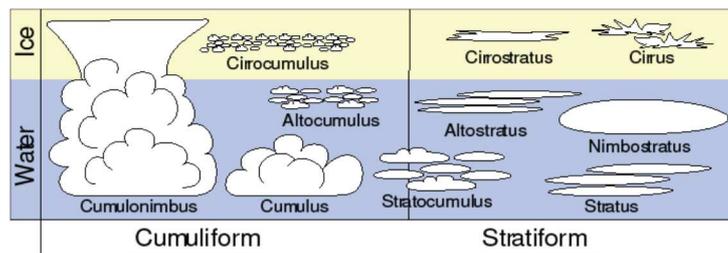
Signifie que le nuage en entier, et pas seulement ses bords, possède un aspect vaporeux. C'est le cas pour les nuages de très haute altitude formés uniquement de glace.

3.2.2.4 Nimbus

Signifie que le nuage apporte la pluie. Il est toujours associé avec un cumulus ou un stratus.

3.2.2.5 Le préfixe Alto

Indique que le nuage est à haute altitude, mais inférieure à un nuage de type cirrus.



Cumulo-nimbus



Cirrus



Cumulus



Stratiform

Figure 3.3 – Types de nuages communs.

3.3 Quelle est la couleur d'un nuage ?

Un nuage n'émet pas de lumière, il reflète seulement la lumière incidente. Puisqu'il n'absorbe aucune partie du spectre visible, ses couleurs sont celles de la lumière qu'il reçoit, qui n'est pas seulement la lumière du soleil, comme nous le verrons dans cette section.

3.3.1 La lumière du soleil

La majorité de la lumière que reçoit un nuage pendant la journée vient du soleil. En conséquence, la couleur d'un nuage est principalement celle du soleil. C'est pourquoi nous voyons des nuages blancs à midi et des nuages rouges au crépuscule.

3.3.2 La lumière du ciel

Cependant, le soleil n'est pas la seule source de lumière pour un nuage. L'illumination du nuage due au ciel est au moins le quart de celle du soleil et devient beaucoup plus importante que le soleil. En conséquence, le ciel est parfois la principale source de lumière pour un nuage, d'où les couleurs d'un nuage sont également composées des couleurs du ciel (Figure 3.4 (a)). Puisque le ciel est une source très claire, les couleurs qu'elle donne aux nuages sont plus douces que les couleurs contrastées du soleil.

3.3.3 La lumière du sol

Comme le ciel, le sol est une source de lumière importante pour les nuages, surtout quand son albédo est élevé. En conséquence, la couleur d'un nuage n'est pas tout simplement blanche, mais montre aussi des teintes de bleu, de vert ou marron, comme on le voit sur les figures 3.4 (b).

Même si nous avons amélioré la saturation de l'image pour mieux montrer l'effet de la lumière du sol sur les nuages, son importance n'est pas négligeable [NND96]. En effet, les nuages apparaissent non réalistes lorsque ces effets ne sont pas reproduits en images de synthèse.

En plus de la réflexion du ciel et de soleil, le sol reflète également la lumière provenant du fond des nuages. Dans certains cas (par exemple, les nuages sont épais et le sol a un albédo élevé), ces inter-réflexions sont loin d'être négligeables et provoquent des effets de water Sky ou Ice Blink décrits dans les figures 3.5 (d) et 3.5 (c).



(a) Le ciel est une source de lumière importante pour ce nuage.



(b) La terre herbeuse reflète la lumière du soleil et brille sur les nuages, donnant leurs teintes vertes.

Figure 3.4 – Gauche : photos des nuages. Droite : les mêmes photos avec amélioration de la saturation de couleurs. Notons comment les nuages montrent les teintes bleues et vertes.

3.3.4 Autres types de nuages

Un nuage n'est généralement pas seulement entouré par le ciel et la terre, mais aussi par d'autres nuages. Puisque les nuages peuvent être très brillants, il est certain qu'ils agissent comme sources de lumière sur l'un et l'autre et que les inter-réflexions complexes se produisent entre eux.

3.3.5 Apparence des nuages durant la nuit

Durant la nuit, la lune prend le rôle du soleil. Puisqu'elle est beaucoup moins lumineuse, la luminance des nuages est principalement dans la gamme scotopique. L'œil humain ne se sature pas quand il regarde les nuages et il voit les parties de gradation des nuages en noir. Les lumières des zones urbaines sont aussi une source de lumière importante (Figure 3.5 (a) et 3.5 (b)).



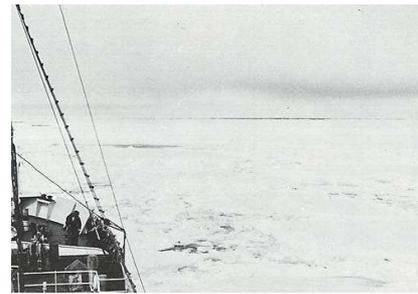
(a) La Tour Eiffel en arrière-plan éclaire les nuages au-dessus d'elle



(b) Les nuages ont une teinte orange au-dessus de la ville



(c) Ice blink



(d) Water sky

Figure 3.5 – Effets de la terre sur les couleurs d'un nuage.

3.4 Caractéristiques des cumulus

3.4.1 Caractéristiques de la forme

Les cumulus ont des caractéristiques très spécifiques, ils possèdent un aspect compact et presque solide, avec une surface relativement bien définie. La forme de cette surface est formée par des turbulences et des courants ascendants.

Les cumulus possèdent également une structure multi-échelle des bulles : les bulles se formant dans l'air ambiant (bulles mères) grossissent, et des turbulences apparaissent alors sur les bords. Ces turbulences se transformant en nouvelles bulles lorsque les conditions atmosphériques nécessaires sont réunies.

Ces nouvelles bulles ont notamment une taille caractéristique, déterminée par la lacunarité (rapport entre la taille d'une bulle et la taille des bulles se format à sa surface) du nuage. De même que leur bulle mère, ces nouvelles bulles vont ensuite grossir et s'étendre, et de nouveau à leur surface apparaîtront de nouvelles bulles, et ainsi de suite [Ney00].

Enfin, les nuages ne peuvent se former qu'à partir d'un certain seuil d'altitude (appelé point de rosée), l'eau présente en dessous de cette hauteur étant obligatoirement sous forme de vapeur. Il en résulte que la partie basse des cumulus apparaît comme 'tronquée par une limite virtuelle qui est cette altitude de

condensation. Un fond plat est donc caractéristique de la forme de ces nuages, lorsqu'ils sont suffisamment bas (Figure 3.6).



Figure 3.6 – Un fond plat d'un vrai cumulus.

3.4.2 Caractéristiques visuelles

Les cumulus sont en particulier extrêmement denses et épais, ceci implique une caractéristique unique et essentielle : la dispersion est quasiment isotrope (i.e., la lumière est renvoyée dans toutes les directions), sauf dans la fine couche externe qui sépare le nuage de l'air ambiant, visible sur la silhouette [Ney00].

En effet, la lumière réémise par un élément de surface a presque la même énergie que celle reçue (du à l'albédo important). Si cette lumière réémise est reçue par un autre élément de surface, elle augmente de façon significative la quantité d'énergie que ce second élément de surface reçoit et réémet. De cette façon, les inter-réflexions ne sont quasiment pas absorbées, et les concavités sur la surface du nuage (entre les bulles, par exemple) agissent comme des pièges à lumière : toute l'énergie reçue est réémise suivant un angle solide restreint (plutôt que 2π pour une surface plane), ce qui rend certaines concavités presque aussi lumineuses que le soleil. Ceci donne parfois l'impression que le nuage est illuminé depuis l'intérieur, puisque l'intérieur des sillons semble être bien plus lumineux que la surface autour.

Ce comportement peut aussi survenir, moins intensément cependant, dans les endroits qui ne sont pas éclairés directement par le soleil. D'autre part, ce phénomène se produit quelle que soit l'échelle des concavités, de la plus locale à la plus macroscopique.

Enfin, la corolle d'un cumulus a un aspect relativement différent de celui du cœur du nuage. En effet, étant donné la faible densité de particules d'eau au niveau de la surface du nuage, la dispersion cumulée reste principalement dans la même direction et vers l'avant, et non isotrope (notons que les nuages diffus tels que les stratus ou les jeunes cumulus possèdent cette propriété en tout point). Ceci rend les cumulus très contrastés : lorsqu'ils sont illuminés par l'avant, le corps est intensément blanc et la corolle est relativement transparente, et de la couleur du ciel.

Lorsqu'il est illuminé par l'arrière, le cœur du nuage est extrêmement sombre et homogène, alors que la corolle est lumineuse, grâce au 'forward scattering' (Figure 3.7).

En fait, le peu de lumière réémise par le nuage dans les zones d'ombres ne provient pas de la lumière traversant le nuage, mais principalement des réflexions du ciel et du sol, et encore plus probablement des réflexions de la lumière par les autres parties du nuage.



Figure 3.7 – Un vrai cumulus illuminé par l'arrière. Notons la différence entre le corps du nuage, sombre, et la corolle, transmettant la lumière.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons identifié les aspects importants de l'apparence d'un nuage du point de vue de l'observateur humain. Pour être réalistes, nos méthodes doivent reproduire ces éléments visuels :

- Prendre en considération l'environnement lumineux complet d'un nuage, i.e., non seulement le l'ensoleillement, mais également la contribution du ciel et celle du sol.
- Reproduire les aspects les plus importants de la forme des nuages, i.e., l'aspect de ses contours (tandis que le contenu exact de son cœur est moins important).
- Reproduire les caractéristiques visuelles inhérentes aux nuages : un côté éclairé détaillé, contrasté et lumineux, un côté non éclairé sombre et doux, des bords lumineux et contrasté lorsqu'ils sont vus du dessous et sombres lorsqu'ils sont vus du dessus, des creux lumineux,... etc.
- Afficher les nuages dans un environnement décent (i.e., au sein d'un paysage et un ciel réaliste).

Chapitre 4

*Les concepts liés à la simulations et
aux rendu des interactions lumineuses.*

Décrire l'illumination d'une scène quelconque nécessite une connaissance des réactions physiques que la lumière va avoir sur les différents objets de la scène. Pour obtenir une telle connaissance, nous devons nous intéresser de plus près à la physique de la lumière et au transport de cette dernière dans les matériaux.

Dans ce chapitre, les notions de base de physique nécessaires à la compréhension du présent rapport sont présentées. Dans une première section, les généralités des transferts radiatifs régissant le transport de la lumière du soleil dans une scène d'extérieur sont introduites. Puis dans une deuxième section, les termes qu'il est indispensable de connaître sont définis. Nous aborderons ensuite les modèles physiques de représentation des interactions lumineuses dans les nuages et dans l'atmosphère pour arriver à exprimer l'équation régissant les transferts radiatifs dans une scène d'extérieur.

4.1 Généralités

4.1.1 Dispersion atmosphérique

Le soleil disperse son énergie sous la forme d'un rayonnement lumineux. Comme il étant très éloigné de la Terre, il est considéré comme une source de lumière directionnelle.

Dans l'atmosphère terrestre qui contient des molécules d'air et d'eau, un rayon lumineux a une probabilité non nulle de rentrer en collision avec cet amas de molécules.

Si on suppose que l'atmosphère est composée uniquement de molécules d'air, et que la réflectance de ces molécules est proche de 1 (une réflectance proche de 1, signifie simplement que l'on peut négliger l'absorption due à la molécule), alors après qu'un rayon lumineux rentre en collision avec cet amas de molécules, il sera entièrement distribué dans d'autres directions selon une certaine probabilité à l'aide d'une fonction de phase. Ces redirections multiples diffusent la lumière du soleil initiale dans l'atmosphère. Ainsi, un point visible sur le nuage va recevoir de l'illumination directe du soleil et de l'illumination indirecte du soleil. L'illumination indirecte due à la dispersion atmosphérique participe à la modification de la couleur des objets distants par perspective aérienne [Vid08].

La perspective aérienne ("bleuissement" des objets avec la distance) est due à la transparence de l'atmosphère. Elle correspond au bleuissement des objets lointains sombres (montagnes) et au rougisement des objets brillants au crépuscule et à l'aurore [REK04]. Elle s'observe par un léger blanchissement vers l'horizon (brume d'aérosols),

La prise en compte de la perspective aérienne est essentielle au réalisme de la scène visualisée [PSS99], car c'est un indice fondamental sur la distance à laquelle se trouve un objet. Elle varie d'ailleurs en fonction de la distance et de la direction d'observation et tend vers la couleur du ciel.

Plus un objet est distant à l'observateur plus elle va modifier l'apparence de l'objet (bleu par temps clair ensoleillé et gris par temps couvert). Plus l'objet observé est près du sol, plus la perspective aérienne est importante (car la densité atmosphérique est plus importante près du sol).

4.1.2 Réflexions

Un rayon lumineux qui entre en collision avec le sol sera réfléchi dans une direction et avec une proportion qui dépend des propriétés matérielles du sol. La proportion d'énergie lumineuse entrante qui est réfléchi est généralement assimilée à la notion de réflectance.

Les réflexions se produisent aussi lorsqu'un rayon de lumière entre en contact avec une couche nuageuse. En fait, une partie du rayon lumineux traverse le nuage et l'autre est réfléchi. La quantité de lumière réfléchi est liée à la réflectance diffuse du nuage R_{ms} (pour un nuage assez épais) et celle qui traverse le nuage à la transmittance diffuse du nuage T_{ms} (sachant que $R_{ms}+T_{ms}=1$) [Vid08].

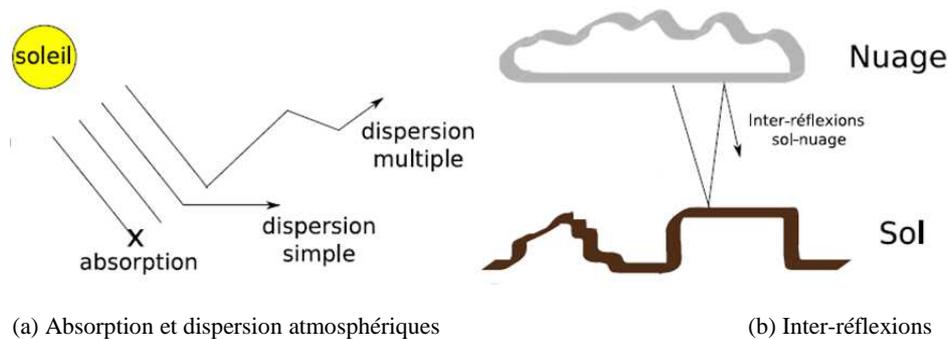


Figure 4.1 – Illustrations des transferts radiatifs.

4.2 Définitions des concepts clés liés aux transferts radiatifs

La lumière est l'ensemble des ondes électromagnétiques perceptibles par l'œil qui correspond à un dégagement d'énergie évacuée par des photons (flux de particules). Ce dégagement est caractérisé par une puissance qui s'exprime en Watt (W).

Le spectre visible de la lumière contient les ondes lumineuses de longueur d'onde comprise entre 380 (violet) et 770 (rouge) nm (10^{-9} m). Le spectre invisible de la lumière comprend par exemple les infrarouges (chaleur) et les rayons ultra-violet (destructeur de liaisons moléculaires).

De notre point de vue macroscopique, il nous est impossible de mesurer l'action d'un seul photon sur un médium (qu'il soit solide ou gazeux). Nous devons donc définir des grandeurs mesurant l'influence de la lumière sur des surfaces ou des volumes.

4.2.1 La Radiance

La radiance sortante ou entrante (radiance est un terme anglais désignant la luminance énergétique) est définie comme un flux d'énergie lumineuse en un point x et une direction \vec{s} donnée de l'espace.

Elle décrit l'intensité lumineuse émise ou reçue par une surface dans une direction donnée divisée par l'aire apparente dans cette direction. Pour des sources de lumière non ponctuelles, elle s'exprime par unité d'aire perpendiculaire à la direction (surface source) et par angle solide unitaire (angle solide source). La luminance est exprimée en Watt par stéradian par mètre carré $W/m^2 \cdot sr$.

La radiance est notée L .

4.2.2 L'Irradiance

L'irradiance (terme anglais désignant l'éclairement) est la puissance lumineuse reçue par une surface par unité d'aire. L'éclairement est exprimé en Watt par mètre carré W/m^2 .

L'irradiance est notée E .

Pour calculer l'irradiance incidente en un point x , une intégration de la radiance incidente sur l'hémisphère $H(x)$ est effectuée (la radiance incidente $L^i(x, \vec{w})$ est la radiance totale émise dans la direction \vec{w} vers x) :

$$E[L^i](x) = \int_{\vec{w} \in H(x)} L^i(x, \vec{w}) \vec{w} \cdot \vec{n}(x) \, d\omega \tag{4.1}$$

Soulignons la présence du terme $\vec{w} \cdot \vec{n}(x)$ qui représente géométriquement le pourcentage de l'énergie du rayon de lumière incident attribué au point x . Cela s'explique par le fait que la radiance s'exprime par unité d'aire perpendiculaire à la direction. Un cône de lumière arrivant selon la direction opposée de la normale du point x , aura tendance à donner toute son énergie à x , tandis qu'un cône arrivant avec une direction proche de l'horizon ne donnera qu'une infime partie de son énergie à x (l'aire projetée du cône est alors conséquente).

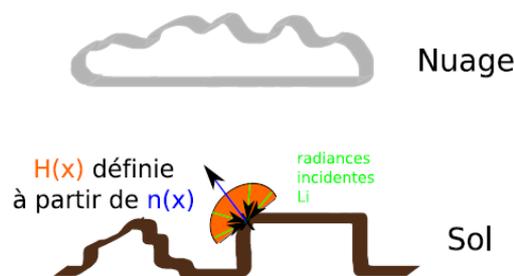


Figure 4.2 – Illustration du calcul de l'irradiance.

4.2.3 L'Intensité lumineuse

L'intensité lumineuse (radiant intensity en anglais) décrit la quantité de lumière émise dans une direction donnée. L'intensité est exprimée en Watt par stéradian W/sr .

L'intensité est notée I .

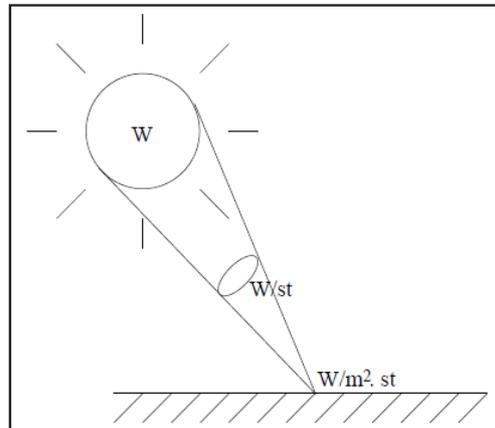


Figure 4.3 – Notion physique d'intensité lumineuse.

4.2.4 Contact avec un Corps

Lorsqu'un photon entre en contact avec un corps, le corps accumule l'énergie de la radiation. Puis, le corps va réémettre de l'énergie sous forme de photons dans différentes directions. On appelle la première partie l'absorption et la seconde, l'émission (on parle d'émission secondaire, car elle est induite par l'absorption).

4.2.4.1 L'Absorption

À l'échelle des photons, l'absorption représente le phénomène par lequel l'énergie du photon est prise par une autre particule.

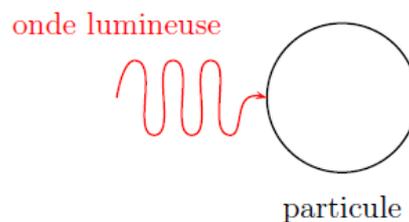


Figure 4.4 – L'Absorption.

La figure 4.4 représente l'étape de l'absorption. Un photon (représenté sous forme ondulatoire) vient toucher une particule. L'onde s'arrête au niveau de la surface de contact et l'énergie du photon est transférée à la particule.

4.2.4.2 L'Émission

Après avoir pris l'énergie du photon, la particule peut réémettre des photons (émission lumineuse comme le présente la figure 4.5) ou augmenter son agitation (donc la température).

On parle généralement de *scattering* pour décrire l'émission secondaire. On parle de *n-scattering* pour décrire le parcours d'un photon issu de l'absorption et l'émission successive de photons par n particules.

Pour la plupart des substances, le taux d'absorption varie avec la longueur d'onde de la lumière incidente, ainsi un matériau de couleur noire absorbe toutes les longueurs d'onde (converties en chaleur), alors qu'un matériau de couleur blanche les réfléchit.

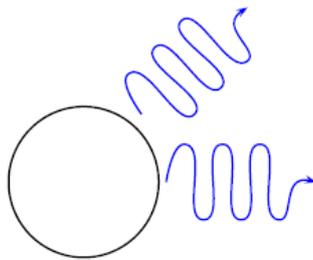


Figure 4.5 – L'Émission.

4.2.5 Coefficient d'absorption, de dispersion et d'extinction d'une molécule

Le coefficient d'absorption β^a (en m^{-1}) d'un milieu contenant une certaine densité de molécules (un seul type de molécule) traduit la probabilité d'absorption d'un flux lumineux par les molécules par unité de longueur parcourue. L'énergie lumineuse absorbée est transformée sous une autre forme (chaleur, etc.).

Le coefficient de dispersion β^d (en m^{-1}) d'un milieu contenant une certaine densité de molécules traduit la probabilité de dispersion d'un flux lumineux par les molécules par unité de longueur parcourue.

Le coefficient d'extinction $\beta^e = \beta^a + \beta^d$ (en m^{-1}) d'un milieu contenant une certaine densité de molécules, traduit la probabilité de collision avec les molécules dans le milieu (donc d'extinction le long du chemin actuel) par unité de longueur parcourue.

À la notion de coefficient d'extinction est souvent associée la notion de libre parcours moyen ou *mean free path* $l_0 = 1/\beta^e$.

4.2.6 Profondeur optique

La profondeur optique τ le long d'un segment entre x_1 et x_2 est l'intégrale du coefficient d'extinction le long du segment [REK04] :

$$\tau(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} \beta^e(x) dx \quad (4.2)$$

4.2.7 La Fonction de Phase

La fonction donnant la probabilité de voir de la lumière dans la direction w_1 quand une particule est éclairée dans la direction w_0 est appelée *fonction de phase*. Cette fonction caractérise la réponse lumineuse d'une particule à un éclairage. Elle décrit la distribution angulaire de la lumière diffusée par un petit volume et s'exprime en sr^{-1} . Elle ne dépend que des propriétés des particules et non de leur quantité (densité).

4.2.7.1 Propriétés de la fonction de phase

La fonction de phase est normalisée :

$$\int_{S^2} \int_{S^2} f(w_0, w_1, \lambda) dw_0 dw_1 = 1 \quad (4.3)$$

Dans les cas qui nous intéressent, les particules sont sphériques. Cette propriété permet de ne faire dépendre la fonction de phase que de la direction d'émission w_1 .

4.2.7.2 La BRDF

Dans le cas où l'absorbant est une surface, on nomme la fonction de phase par la *BRDF* (*Bidirectional Reflectance Distribution Function* en anglais).

Une BRDF (en sr^{-1}) décrit l'interaction de la lumière sur une surface opaque (le sol). Elle dépend de la position de la surface, d'une direction d'incidence et d'une direction de réflexion (les directions sont situées sur un hémisphère unitaire et peuvent donc être décrites par 2 angles en coordonnées sphériques). La BRDF est définie mathématiquement grâce à la radiance sortante et l'irradiance d'une surface en un point :

$$\text{BRDF}(x, \Omega, \phi, \lambda) = \frac{dL(x, \Omega)}{dE(x, \phi)} \quad (4.4)$$

Où x est le point de la surface étudiée (est la direction sortante depuis le point x , ϕ est la direction entrante vers le point x et λ est la longueur d'onde du rayon lumineux entrant.

4.2.7.2.1 Propriétés de la BRDF

La BRDF doit respecter le principe de conservation de l'énergie. Une surface n'étant pas une source primaire ne peut pas renvoyer plus de lumière qu'elle n'en reçoit. On a donc :

$$\int_{\Omega \in H^2} BRDF(x, \Omega, \phi, \lambda) d\Omega d\phi \leq 1 \quad (4.5)$$

Une BRDF bien connue est la *BRDF diffuse* (aussi appelée *BRDF lambertienne*). Cette BRDF est constante pour toute direction Ω . On parle généralement d'une surface "lambertienne" (ou diffuse) quand la BRDF de cette dernière est lambertienne.

4.2.8 L'Albédo

L'*albédo* est l'intégrale de la BRDF sur l'hémisphère. C'est le rapport de l'énergie solaire réfléchie (l'énergie lumineuse émise pour des surfaces réfléchives) par une surface sur l'énergie solaire incidente (l'irradiance).

Elle varie entre 0 correspondant au noir, pour un corps avec aucune réflexion (toute lumière reçue est absorbée) et 1 pour un corps qui diffuse dans toutes les directions et sans absorption de tout le rayonnement électromagnétique visible qu'il reçoit (toute lumière reçue est réfléchie).

Cette grandeur sans unité permet mesure la réflectivité d'une *surface lambertienne* (surface diffuse qui réfléchit de manière identique la lumière dans toutes les directions), c'est-à-dire le pourcentage de lumière incidente réfléchie (ou absorbé indirectement). Plus une surface réémet de la lumière, plus elle a un albédo élevé.

Par exemple, les nuages ont un albédo proche de 1, car presque toute la lumière atteignant le nuage est retransmise, au contraire de la terre, dont l'albédo se situe entre 0.2 et 0.4 (donc une majeure partie des rayons lumineux touchant le sol vont lui transmettre leur énergie sous forme de chaleur).

4.2.9 La transmittance

Le terme de transmission est parfois utilisé dans la littérature. Il représente la quantité de lumière qui passe à travers une surface pour lequel on peut clairement définir le côté éclairé et le côté non éclairé. Il peut être considéré comme une BRDF pour la lumière transmise.

4.2.10 L'atténuation

Le terme d'atténuation est utilisé pour décrire la partie de la lumière entrant dans un objet ne le traverse pas. L'atténuation peut avoir différentes causes, L'absorption est la première cause qui vient

habituellement à l'esprit, mais la dispersion est également une cause d'atténuation. C'est la dispersion qui provoque l'atténuation dans les nuages, puisque leur absorption est négligeable.

4.3 Interactions lumineuses dans les nuages

Nous avons vu précédemment une vision globale des interactions lumineuses. Nous allons maintenant l'appliquer aux nuages. Nous devons pour cela étudier ce que sont les nuages.

4.3.1 Les Nuages

Les nuages sont des "objets" qui reflètent une partie de la lumière directe qu'ils reçoivent sur leur dessus et donc ils projettent leur ombre sur le sol (en fonction de leur épaisseur, cette ombre sera plus ou moins apparente).

Les nuages sont composés majoritairement de gouttelettes d'eau sphériques en suspension dans l'air, qui réfléchissent la lumière sans l'absorber. Ces gouttelettes d'eau proviennent de la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air. Ces gouttelettes ont un diamètre de l'ordre de 10^{-5} m, ce qui entraîne une dispersion de la lumière différente de la dispersion atmosphérique qui est due aux molécules de l'atmosphère. La distribution de la densité et La taille des gouttelettes d'eau ne sont pas uniformes au sein d'un nuage.

Une caractéristique intéressante à tous les types de nuages, les nuages épais en particulier est que l'albédo est très proche de 1 (il n'y a quasiment aucune absorption), ce qui explique la couleur blanche qui apparaît dans les parties fines, le dessus ou les côtés d'un nuage éclairés par le soleil.

Pour un nuage assez dense, le bas du nuage n'est en général pas blanc (différents tons de gris). La couleur de la base d'un nuage est aussi influencée par l'auto-ombrage et les inter-réflexions avec le sol, et par le fait que la lumière indirecte qui atteint le dessous d'un nuage est moins importante que la lumière directe qui atteint le dessus du nuage. C'est la théorie de Mie qui permet d'expliquer la couleur des nuages.

4.3.2 La Fonction de Phase et La Dispersion de Mie

4.3.2.1 La Fonction de Phase

Lorsqu'un photon frappe une gouttelette de nuage, la gouttelette n'absorbe pas ce photon, mais elle le disperse. La façon dont la lumière est dispersée par les gouttelettes de nuage est complexe. Pour qu'un photon frappe une gouttelette d'une direction incidente \vec{s} , la fonction de phase décrit la probabilité de voir ce photon dévier dans la direction \vec{s}' lors de la diffusion. Dans le cas de gouttelettes, qui sont à

symétrie sphérique, cette fonction de phase est axialement symétrique et dépend donc uniquement de l'angle de phase θ (aussi appelé angle de diffusion).

4.3.2.2 La Dispersion de Mie

L'optique géométrique ne peuvent pas être utilisés pour calculer la fonction de phase de gouttelettes de nuages parce que la longueur d'onde de la lumière visible ($\lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$) n'est pas négligeable par rapport au rayon des gouttelettes ($15 \mu\text{m} \geq r \geq 1 \mu\text{m}$). Pour calculer cette fonction de phase, il est nécessaire d'utiliser la dispersion de Mie, qui est une solution numérique des équations de Maxwell pour la dispersion du rayonnement électromagnétique par des particules sphériques. La *dispersion de Mie* apparait lorsque la lumière entre en collision avec des particules sphériques.

Cette fonction de phase dépend de nombreux paramètres tels que la température de l'air, de la température de l'eau, la longueur d'onde de lumière λ et le rayon de gouttelette r .

En conséquence, chaque gouttelette a une fonction de phase différente. Figure 4.7 montre un exemple de cette fonction de phase. Dans la pratique, la longueur d'onde de lumière et le rayon sont les paramètres les plus importants pour les gouttelettes des nuages .

Les aérosols et les gouttelettes d'eau (nuages) obéissent à la dispersion de Mie. C'est la théorie de Mie qui par exemple permet d'expliquer la couleur des nuages. La fonction de phase est anisotropique, avec une redirection de préférence vers l'avant (*strong forward scattering*). Cette dispersion est inversement proportionnelle au carré de la taille des particules et ne dépend pas de la longueur d'onde. Pour la fonction de phase de la diffusion de Mie, une expression analytique approchée est (fonction analytique Henyey-Greenstein améliorée d'un point de vue physique) :

$$P_m(\theta) = \frac{3}{8\pi} \frac{(1-g^2)(1+\cos^2 \theta)}{(2+g^2)(1+g^2-2g \cos \theta)^{3/2}} \quad (4.6)$$

Le paramètre g permet de contrôler l'anisotropie du modèle : c'est le cosinus moyen de l'angle de redirection. Avec $g > 0$, les rayons lumineux sont dispersés de préférence vers l'avant. Avec $g < 0$, ils sont principalement redirigés vers l'arrière.

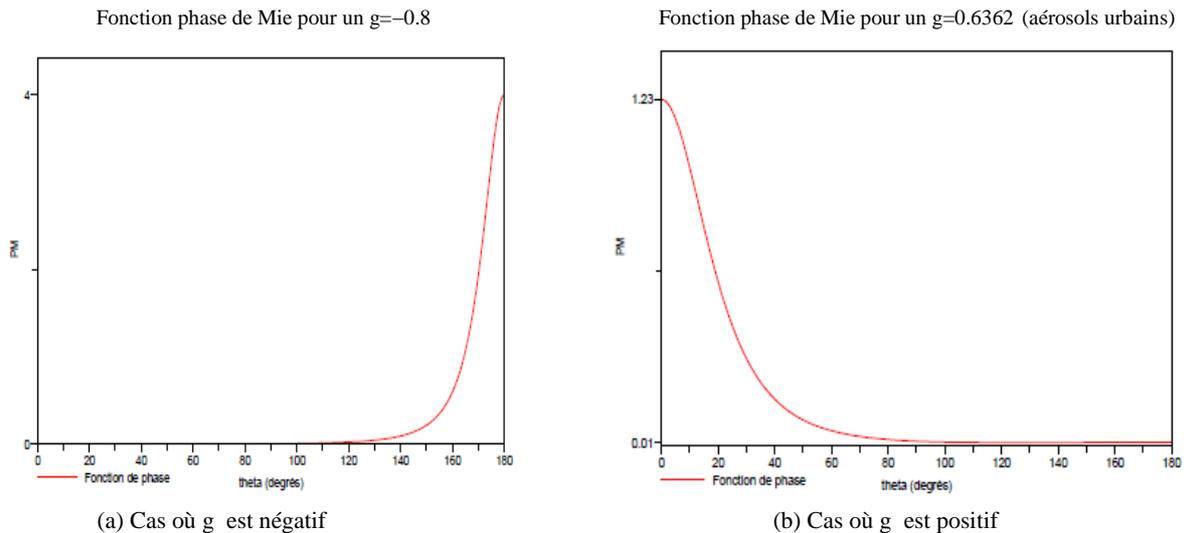


Figure 4.6 – Fonction de phase de Mie.

4.3.2.2.1 Caractéristiques de la fonction de phase

Quand l'œil humain regarde à un nuage, il ne voit pas chaque gouttelette de manière indépendante, mais plutôt floue, et uniforme parce que les gouttelettes sont assez petites et nombreuses de sorte que l'œil ne puisse les distinguer. Ainsi, ce que voit un humain n'est pas le résultat de la diffusion par une seule gouttelette, mais par un ensemble de gouttelettes.

Par conséquent, ce que nous sommes vraiment intéressés n'est pas la fonction de phase d'une seule gouttelette donnée, mais la fonction de phase d'un volume donné de gouttelettes.

La fonction de phase effective montre des caractéristiques distinctives inhérentes pour les gouttelettes de nuages. Premièrement, il est hautement anisotrope (à noter que l'axe Y de la figure 4.7 est sur une échelle logarithmique). Le cosinus moyen de l'angle de redirection ou le paramètre g donne une idée de l'anisotropie d'une fonction de phase.

La figure 4.7 permet de visualiser plusieurs éléments importants :

- Le *pic avant* ou *scattering avant* est la zone angulaire autour de 0° ayant la plus forte intensité de réflexion.
- Le *lob avant* qui entraîne une diffusion de la lumière dans le nuage.
- Les *pics arrière* ou *scattering arrière* sont composés de trois pics importants responsables d'effets visuels forts (changement notable d'intensité lumineuse à la surface du nuage).

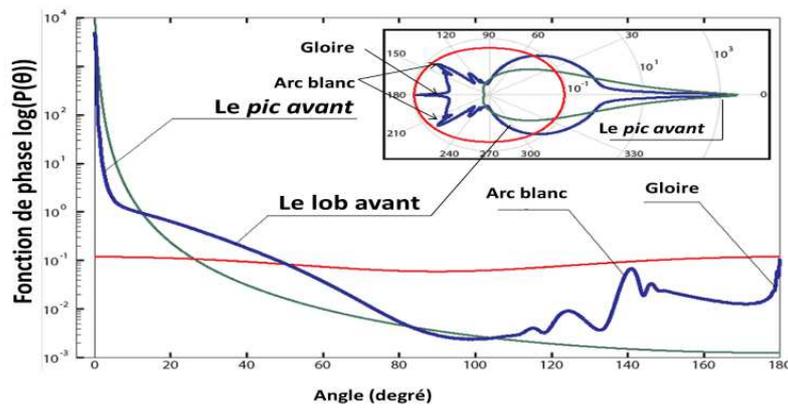


Figure 4.7 – Graphe logarithmique de fonctions de phases couramment utilisées.

Rouge: Rayleigh. Vert: Henye-Greenstein avec $g = .99$. Bleu: Mie.

4.3.2.2 Le Scattering dans les Nuages

La complexité de la *fonction de phase de Mie* associée à l'albédo élevé du nuage entraîne un nombre de *scatters* moyens élevé dans le nuage (dépendant des propriétés du nuage). La figure 4.8 présente différents types de scattering dans un nuage [Bou08].

Multiple Scattering

Puisque les nuages que nous étudions ont un court chemin libre moyen (10m - 30 m), un photon entrant dans le nuage sera probablement touché une gouttelette dans les premiers 10m - 30m de son parcours après être entré dans le nuage. Il sera ensuite dispersé selon la fonction de phase de Mie, c.-à-d., probablement dans la direction vers l'avant. Il continuera donc son parcours à travers le nuage. Mais 10m - 30m après le premier événement de dispersion, il y a des chances que ce photon va toucher une autre gouttelette et se disperser à nouveau. Si l'albédo de gouttelettes de nuages était faible, ce photon serait absorbé. Mais comme il est très élevé, le photon sera dispersé jusqu'à ce qu'il parvienne à quitter le nuage. Étant donné qu'un nuage s'étend sur plusieurs kilomètres, le photon sera probablement dispersé à plusieurs fois avant de quitter le nuage.

Il n'est pas rare pour un photon de disperser des centaines de fois dans un nuage. Ce phénomène est appelé la dispersion multiple et c'est ce qui régit le transport de la lumière dans un nuage.

La dispersion vers l'avant-multiple

Comme la fonction de phase de gouttelettes de nuage est fortement dispersée vers l'avant, l'intuition pourrait amener quelqu'un à penser que le résultat de la dispersion multiple est fortement anisotrope dans la direction vers l'avant. Cependant, même si nous savons précisément le comportement

de dispersion au niveau des gouttelettes, le résultat de la diffusion multiple de la lumière par un nuage est très complexe et loin d'être semblable à ce qui se passe au niveau microscopique.

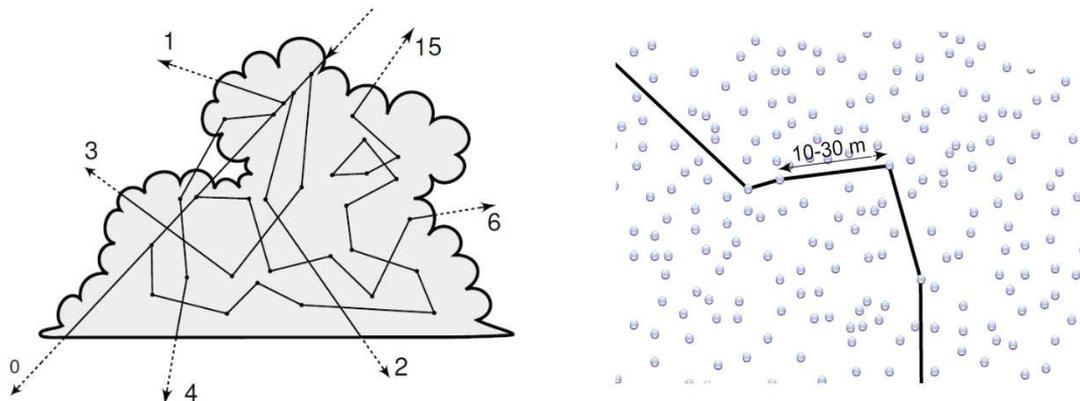


Figure 4.8 – Différents ordres de scattering dans un nuage.

Multiple scattering est ce qui régit le transport de la lumière dans un nuage. Un photon entrant dans un nuage peut le traverser sans toucher n'importe quelle gouttelette (ordre 0), ou après un événement de diffusion (d'ordre 1), ou après deux événements de diffusion (ordre 2), ou 3, 4, etc. Notez que l'image est une schématisation. Puisqu'un nuage très dense, en réalité, les chemins libres sont beaucoup plus courts que ce qui est indiqué sur la figure.

4.3.2.2.3 Le Phénomène de Gloire et d'Arc blanc

Le *phénomène de Gloire* (*Glory* en anglais) est la conséquence directe du pic arrière central de la fonction de Mie (Figure 4.7). Lorsque la caméra (ou l'œil) est dans la direction antisolaire, on peut voir ce phénomène. L'ouverture de la Gloire est directement dépendante de la taille des particules d'eau et peut varier de 5 à 20 degrés.

Le *phénomène d'Arc blanc* (*Fogbow* en anglais) est la conséquence directe des deux pics de part et d'autre du pic arrière de la fonction de Mie (Figure 4.7). De même qu'une Gloire, un Arc blanc est variable selon la taille des particules d'eau dans le nuage [Bou08].

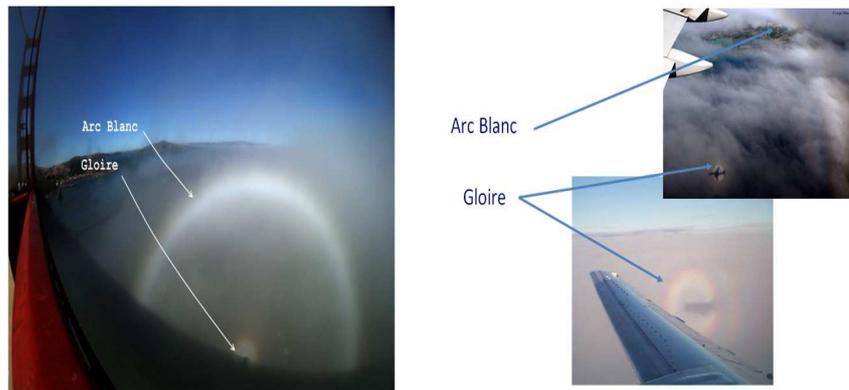


Figure 4.9 – Une gloire et un arc blanc.

La figure 4.9 présente la photographie des deux effets optiques cités précédemment. Ces deux effets sont liés par la fonction de Mie et donc apparaissent simultanément.

4.3.2.2.4 Le Phénomène de Silver Lining

Le *phénomène de Silver Lining* est la conséquence du *pic avant* de la fonction de phase. Cet effet se caractérise par une intensité lumineuse plus importante sur le contour du nuage. Le nombre de scattering moyen pour un photon traversant le nuage en bordure étant faible, on peut ressentir l'effet non atténué du pic avant de la fonction de Mie.



Figure 4.10 – L'effet "Silver Lining": les bords et les parties fines de nuages sont beaucoup plus lumineux que leur cœur quand on regarde vers le soleil.

4.3.3 Transparence

La *transparence* est la traversée de rayon lumineux à travers un médium sans être absorbé. Dans le cas des nuages, on définira la transparence comme la probabilité qu'un rayon lumineux ne soit pas dévié lors de son passage dans le nuage.

En considérant la densité de probabilité des particules du médium comme uniforme, on obtient que la transparence puisse être exprimée comme suit :

$$\tau(H) = \kappa e^{-\kappa H} \quad (4.7)$$

Où H est la longueur du chemin à travers le nuage et κ est le coefficient d'extinction (L'inverse du chemin moyen que parcourt un photon avant d'être *scatterisé*).

On définit aussi la probabilité qu'un rayon lumineux soit dévié à une distance d'exactement Hm dans le nuage :

$$s(H) = \kappa e^{-\kappa H} \quad (4.8)$$

4.3.4 L'influence des Nuages sur le Sol et l'inverse

Il est évident que les nuages occultent la lumière venant du Soleil et ombrent le sol.

La première interaction (directe) entre le sol et les nuages est l'ombre portée : les nuages projettent des ombres sur le sol en fonction de la position du soleil. Ces ombres hautes résolutions peuvent être calculées par carte d'ombre (shadow map, [Wil78]). Mais les nuages, à cause de leur albédo très élevé, reflètent aussi la lumière venant du sol.

Le deuxième type d'interaction (indirecte) entre le sol et le nuage est les inter-réflexions (échanges d'énergie lumineuse). Pour les inter-réflexions sol-bas des nuages, le sol et le bas des nuages sont des réflecteurs lambertiens (idéalement diffus). La base d'un nuage reflète la radiance émise par le sol, car l'albédo d'un nuage est élevé.

Cela étant, les nuages stoppent la lumière arrivant sur la terre, mais permettent aussi aux régions sous elles de ne pas être trop sombres (en réfléchissant la lumière provenant des zones éclairées). La figure 4.11 est une représentation de ces deux phénomènes (occlusion et illumination indirecte du sol).

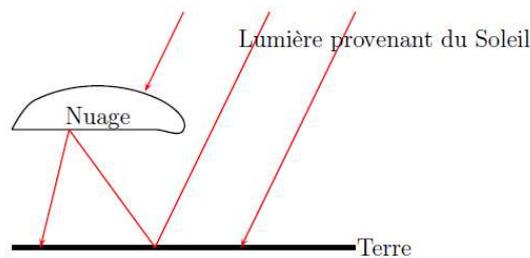


Figure 4.11 – Influence des Nuages sur l'Illumination de la Terre.

Certains rayons lumineux sont réfléchis par le nuage et ne parviennent jamais au sol. D'autres atteignent la Terre et sont réfléchis vers le bas de la couche nuageuse puis réfléchis de nouveau.

4.4 L'Atmosphère terrestre

La Terre n'est pas de la forme d'une sphère parfaite, mais elle peut être approximée par une sphère entourée par l'atmosphère.

L'atmosphère terrestre peut être approximée par une fine couche sphérique sur la Terre. D'un point de vue physique, l'atmosphère terrestre est modélisée en trois ensembles de molécules, les molécules d'air, les aérosols et les molécules d'eau. Seuls les molécules d'air et les aérosols sont pris en compte pour la diffusion de la lumière pour le modèle de ciel clair [NSTN93, HMS05].

Pour les aérosols et les molécules d'eau, la dispersion de la lumière (dispersion de Mie) est physiquement différente à celle des molécules d'air (dispersion de Rayleigh).

Selon les conditions climatiques et le type de paysage (ex : maritime, urbain, etc.), la distribution de la taille des aérosols et des gouttelettes d'eau est varié.

La Terre est éclairée par la lumière directe du soleil et la lumière indirecte du ciel [NSTN93]. La lumière indirecte du ciel est le résultat de la diffusion de la lumière du soleil par les molécules d'air.

Un observateur va percevoir le ciel vu du sol comme le noir de l'espace plus la dispersion atmosphérique dirigée vers lui. De même pour le sol vu du ciel, il y aura la couleur du sol plus la dispersion atmosphérique. Lorsque le soleil est en position zénithale, l'éclairement du ciel représente 25% de la lumière totale reçue par un observateur sur le sol et lorsque le soleil est proche de l'horizon elle avoisine les 100%. Ainsi, la contribution du ciel est essentielle pour les périodes de crépuscule. D'une manière générale, plus le ciel est chargé en molécules d'eau, en aérosols et en particules diverses, plus il aura tendance à disperser la lumière.

4.4.1 Modèle de base pour modéliser l'atmosphère

Le modèle physique généralement utilisé pour modéliser l'atmosphère et celui du ciel clair avec 2 constituants : les molécules d'air et les aérosols.

Pour les molécules d'air, l'hypothèse simplificatrice de base est celle de la densité à décroissance exponentielle (avec l'altitude) des molécules d'air avec une échelle de hauteur $H_R = 8,4$ km. Pour les aérosols l'hypothèse est celle de la densité à décroissance exponentielle sur $H_M = 1,25$ km.

Pour rendre correctement les effets du crépuscule ou de l'ombre de la terre sur une partie de l'atmosphère [HMS05], il est important de prendre en compte la dispersion multiple des rayons lumineux. Par contre, pour rendre de manière réaliste la lumière en plein jour, il est acceptable de ne considérer que les dispersions/diffusions de la lumière d'ordres zéro et un. Cela s'explique par le fait que la lumière émise par le soleil traversera moins d'atmosphère lorsque l'angle zénithal sera faible (ainsi, la probabilité de dispersion sera plus faible).

Une autre hypothèse simplificatrice acceptable est que la lumière se propage en ligne droite [NSTN93] (car dans la réalité son chemin est courbé à cause de la variation de l'indice de réfraction de l'air avec l'altitude).

4.4.2 Densité et pression de l'atmosphère

La densité et la pression de l'atmosphère décroissent avec l'altitude (à cause de la gravité) et dépendent de l'agitation moléculaire. Comme dans [REK04], l'approximation usuelle est l'hypothèse hydrostatique que l'atmosphère a une décroissance exponentielle avec l'altitude depuis le niveau de la mer. Connaissant le nombre de molécules par unité de volume N (m^{-3}) au niveau de la mer (qui dépend de la température et pression ambiantes), la densité en fonction de l'altitude h pour les molécules d'air est donnée par :

$$\rho(h) = N e^{-h/H_R} \quad (4.9)$$

La densité en fonction de l'altitude h pour les aérosols est donnée par :

$$\rho(h) = N' e^{-h/H_M} \quad (4.10)$$

4.4.3 Dispersion de Rayleigh

Pour les molécules d'air qui ont un albédo important, le coefficient d'absorption $\beta_{Air}^{\alpha} \approx 0$. Le coefficient d'extinction des molécules d'air sera $\beta_{Air}^e = \beta_{Air}^d$. Pour les aérosols l'absorption n'est en général pas négligeable. Le coefficient de dispersion β^d des molécules d'air est linéaire en la densité de molécules, c'est-à-dire qu'il suit la décroissance exponentielle de la densité atmosphérique. Plus ce coefficient sera important, plus un rayon lumineux se dispersera dans l'atmosphère. Pour les molécules d'air, le coefficient de dispersion β_R^d est donné par la théorie de Rayleigh.

Les molécules d'air et plus généralement les très petites molécules obéissent à la diffusion de Rayleigh [PSS99]. La longueur d'onde de la lumière dispersée est la même que celle de la lumière incidente et aucune absorption ne se produit [Slo02]. Le coefficient de dispersion de Rayleigh $\beta_R^d(\lambda)$ ($\beta_R^d(h, \lambda)$ prend en compte la densité liée à l'altitude) est proportionnelle à la puissance -4 de la longueur d'onde de la lumière ($\beta_R^d(0, \lambda) = \beta_R^d(\lambda)$ est la valeur du coefficient de dispersion au niveau de la mer) :

$$\beta_R^d(h, \lambda) = \underbrace{\frac{8\pi^2(n^2-1)^2}{3N\lambda^4}}_{\beta_R^d(\lambda)} e^{-\frac{h}{H_R}} \quad (4.11)$$

h est la hauteur (altitude) par rapport au niveau de la mer, $n = 1.0003$ est l'indice de réfraction de l'air dans le spectre visible, N est le nombre de molécules par unité de volume au niveau de la mer ($N =$

$2.545.10^{25} \text{ m}^{-3}$ pour de l'air à température et pression standards) et $H_R = 8,4 \text{ km}$ est l'épaisseur de l'atmosphère si la densité était uniforme. La formule exacte de $\beta_R^d(\lambda)$ qui prend en compte le facteur de dépolarisation peut être trouvé dans [PSS99].

C'est la diffusion de Rayleigh qui permet d'expliquer la couleur bleue du ciel (la longueur d'onde correspondant au bleu est diffusée environ 10 fois plus que celle du rouge) ou les tons jaune-orangés du lever et coucher de soleil (plus d'atmosphère est traversée lorsque le soleil est proche de l'horizon) [PSS99, Slo02].

La fonction de phase de Rayleigh est symétrique par rapport aux dispersions vers l'avant et vers l'arrière :

$$P_R(\theta) = \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2 \theta) \quad (4.12)$$

θ représente l'angle entre l'observateur et le rayon de lumière incident au point considéré. Le coefficient angulaire de dispersion de Rayleigh est donné par $\beta_R^d(\lambda) P_R(\theta)$. Ce qui donne l'équation de dispersion de Rayleigh suivante :

$$L_\lambda(x, \theta) = L_\lambda^i(x) \beta_R^d(\lambda) P_R(\theta) \quad (4.13)$$

Cette équation décrit comment la lumière incidente $L_\lambda^i(x)$ touchant une molécule d'air en x va se disperser selon toutes les directions possibles.

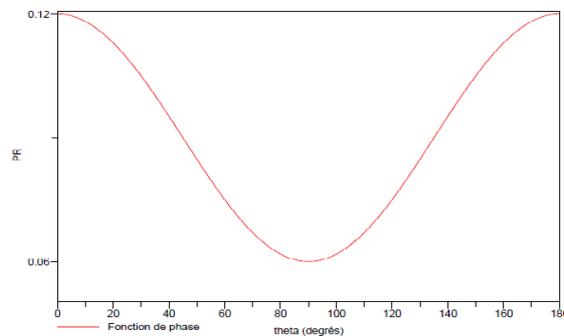


Figure 4.12 – Fonction de phase de Rayleigh.

4.5 Équation du transport de la lumière

Dans cette section, nous allons définir les équations caractérisant le transport de la lumière dans le monde, nous avons besoin de décrire les différents phénomènes lumineux.

Pour rendre une scène en temps réel, le calcul du chemin de paquets de photons (appelé *photon mapping*) ne serait pas utilisable. Nous devons donc présenter nos calculs plus globalement.

4.5.1 Réflexion sur un support solide

L'équation du transport de la lumière adaptée à l'informatique graphique mais suffisamment générale pour encore être liée à la physique est apparue pour la première fois dans le rendu graphique à la conférence de Siggraph'86 [Kaj86]. Elle décrit le transfert de la lumière entre les surfaces dans un environnement. Grâce à une BRDF, elle prend en compte les propriétés des surfaces et il est possible d'y intégrer l'influence du milieu environnant sur les trajets empruntés par les rayons lumineux (absorption et dispersion) [BB09].

Plus de 20 ans après, la résolution exacte de cette équation n'est toujours pas possible en temps réel. A cet effet, des approximations dans les dispersions d'ordre supérieur ou égal à trois et des précalculs ont été utilisés pour dépasser la contrainte de coûts de calculs élevés.

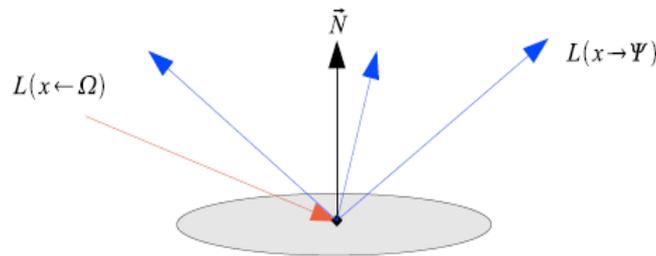


Figure 4.13 – Réflexion sur un support solide.

L'équation donnant la radiance sortante du point x de la surface dans la direction Ω (ou équation de réflexion) est :

$$L(x \rightarrow \Omega) = \int_{H_x} BRDF(x, \Omega \rightarrow \phi) L(x \leftarrow \phi) d\phi + L_e(x \rightarrow \Omega). \quad (4.14)$$

Dans cette équation, on fait la distinction entre la *radiance entrante* $L(x \leftarrow \phi)$ et la *radiance sortante* $L(x \rightarrow \Omega)$. Le domaine d'intégration H_x est le dôme des directions partant de x dont le produit scalaire avec la normale en x est positif.

On fait de plus la distinction entre la radiance émise par le matériau L_e et la radiance réfléchie

$$L_r = \int_{H_x} BRDF(x, \phi \rightarrow \Omega) L(x \leftarrow \phi) d\phi \quad (4.15)$$

La plupart des matériaux (bois, marbre, ...) ne sont pas des sources primaires de lumière.

On a donc $L_e = 0$.

Il est possible de modifier le terme de radiance entrante $L(x \leftarrow \phi)$ en un terme de radiance sortante $L(y \rightarrow -\phi)$. On obtient donc une nouvelle forme de l'équation de réflexion donnant la radiance sortante comme l'intégrale des radiances sortantes des autres points de la scène (équation 4.16).

$$L(x \rightarrow \Omega) = \int_{H_x} BRDF(x, \phi \rightarrow \Omega) L(y \rightarrow -\phi) d\phi + L_e(x \rightarrow \Omega) \quad (4.16)$$

4.5.2 Diffusion dans un milieu particulaire

Dans le cas d'un milieu particulaire, on ne décrit pas les calculs sur une surface, mais dans un volume. Kajiya et Von Herzen ont détaillé ce calcul en utilisant un volume cylindrique infinitésimal et en considérant le différentiel de l'intensité lumineuse dI dans la direction du cylindre [KH84].

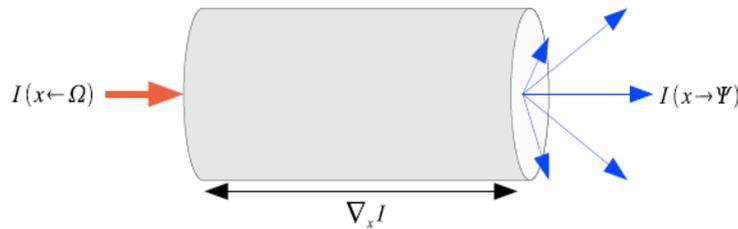


Figure 4.14 – Volume cylindrique infinitésimal.

Nous voulons obtenir l'intensité lumineuse sortant d'un milieu particulaire. Pour cela, nous allons utiliser le calcul de conservation de l'énergie dans ce volume quand il est soumis à une intensité lumineuse arrivant en x dans la direction Ω :

$$\frac{-1}{\kappa \rho} \nabla_x I(x \leftarrow \Omega) - I(x \leftarrow \Omega) + \frac{1}{4\pi} \int_S p(\Omega \rightarrow \Psi) I(x \rightarrow \Psi) d\Psi = 0 \quad (4.17)$$

Le terme $\frac{-1}{\kappa \rho} \nabla_x I(x \leftarrow \Omega)$ est l'atténuation du milieu particulaire.

$I(x \leftarrow \Omega)$ est l'intensité lumineuse entrant dans le volume de particules.

$\frac{1}{4\pi} \int_S p(\Omega \rightarrow \Psi) I(x \rightarrow \Psi) d\Psi$ est l'intensité lumineuse sortante du volume de particules.

κ est le coefficient d'absorption du milieu, ρ est la densité de particules du milieu,

p est la fonction de phase du milieu (obtenue à partir de celles des particules).

Dans ce calcul, Kajiya utilise l'hypothèse que le milieu n'est pas un diffuseur primaire de lumière. L'équation est ici "inversée" par rapport à la réflexion sur un support solide, car on a l'intensité entrante en fonction de l'intensité sortante et non l'inverse.

4.5.3 Le Calcul de Radiosité

On a vu que l'équation de réflexion de la lumière 4.14 nécessitait de connaître la radiance de tous les points de la scène lors du calcul de la radiance d'un point de cette dernière. Cette équation n'est pas solvable telle que présentée. Une méthode de résolution est de faire un calcul de récurrence sur la radiance, en procédant par nombre de réflexions de la lumière.

On peut réécrire l'équation 4.14 comme la somme d'une série de récurrences :

$$L(x \rightarrow \Omega) = \sum_i L^i(x \rightarrow \Omega) \quad (4.18)$$

Où l'on calcule les termes L^i de la façon suivante, en prenant L^0 comme l'illumination directe de la scène:

$$L^{n+1}(x \rightarrow \Omega) = \int_{H_x} BRDF(x, \phi \rightarrow \Omega) L^n(x \leftarrow \phi) d\phi \quad (4.19)$$

Grâce à cette méthode, on peut résoudre l'équation de réflexion 4.16 de manière approchée, mais convergente.

4.5.4 Transmittance ou facteur d'extinction

La transmittance T indique comment l'énergie lumineuse incidente est atténuée par absorption et dispersion sortante en parcourant l'atmosphère (de densité de particules suivant une loi exponentielle). Elle est égale à:

$$T(x_1, x_2) = e^{-\tau(x_1, x_2)} \quad (4.20)$$

La transmittance permet de déterminer l'atténuation de la lumière directe du soleil et d'un rayon dispersé vers un point ou un observateur. Cette perte d'énergie dans une direction \vec{s} , entre un point P_1 et un point P_2 , s'exprime par :

$$L_\lambda(p_2) = L_\lambda(p_1) T(P_1, P_2) \quad (4.21)$$

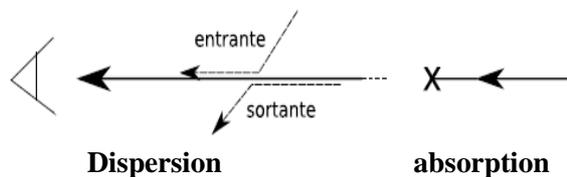


Figure 4.15 – Dispersion entrante, sortante et absorption pour 1 rayon.

4.5.5 Lumière directe du soleil

Pour les calculs de transfert d'énergie lumineuse, le soleil sera traité comme une source de lumière directionnelle, mais il sera considéré comme une source de lumière surfacique pour les calculs d'ombres.

Un point x est illuminé par la lumière directe du soleil, si le soleil est visible depuis ce point ($V(x, \vec{v}) = 1$ pour visible, et 0 pour non-visible). La lumière du soleil L^{soleil} initiale est atténuée par l'atmosphère terrestre. L'illumination directe du soleil est donc :

$$L_0(x, \vec{v}) = V(x, \vec{v}) T(x, x_0) L^{\text{soleil}} \tag{4.22}$$

Dans l'équation ci-dessus, x_0 désigne le point d'intersection entre le rayon lumineux partant de x et de direction \vec{v} et le sol, le dessous d'un nuage ou la frontière atmosphère-espace. $L_0(x, \vec{v})$ vaut 0 si le soleil n'est pas visible (si x_0 est sur le sol ou sur le dessous d'un nuage) ou si v est différent de la direction du soleil. Si x_0 est sur le dessous d'un nuage il faut prendre en compte une source diffuse émise par le dessous des nuages, Si x_0 est sur le dessous d'un nuage il faut prendre en compte une source diffuse émise par le dessous des nuages, $SDN(x_0) = T(x_0, x_1) L^{\text{soleil}} \frac{T_{ms}}{2\pi}$ (x_1 étant un point sur la frontière espace-atmosphère, Figure 4.16). Le facteur 2π signifie diffusé sur les 2π stéradians de l'hémisphère. T_{ms} représente la transmittance diffuse du nuage (pourcentage du rayonnement du soleil qui traverse les nuages) et dépend de l'épaisseur de la couche nuageuse et de la direction zénithale du soleil. Dans ce cas (Figure 4.16).

$$L_0(x, \vec{v}) = T(x, x_0) T(x_0, x_1) L^{\text{soleil}} \frac{T_{ms}}{2\pi} \tag{4.23}$$

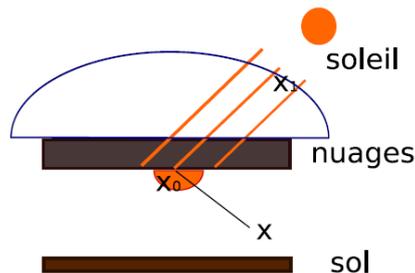


Figure 4.16 – Diffusion de la lumière du soleil par une couche nuageuse.

4.5.6 Lumière indirecte du ciel

Le ciel est une source indirecte résultant de la dispersion de la lumière du soleil dans l'atmosphère. Le ciel est une source de lumière diffuse hémisphérique pour laquelle la radiance émise varie sur l'hémisphère.

L'effet de cette source de lumière se remarque dans les ombres avec un ton légèrement bleuté (zone où la radiance due au soleil est moindre que celle due au ciel). Si on considère un point sur le sol, la contribution indirecte du ciel (irradiance, Figure 4.2) se calcule par $(D(x) \subseteq H(x))$ est la partie de l'hémisphère $H(x)$ où le ciel est visible) :

$$E^{\text{ciel}}(x) = \int_{\vec{w} \in D(x)} L^{\text{ciel}}(x, \vec{w}) \vec{w} \cdot \vec{n}(x) dw \quad (4.24)$$

La radiance reçue depuis le ciel selon une direction dépend de la position de x . Cela s'explique essentiellement par le fait que la radiance reçue dépend de la densité des molécules d'air le long du rayon allant de x jusqu'à la frontière atmosphère-espace. La radiance spectrale émise par le ciel dépend aussi de la date, de l'heure (donne la position du soleil) et des conditions climatiques [PSS99]. En effet, tous ces facteurs influencent la dispersion de la lumière du soleil dans l'atmosphère visible.

En présence de nuages, il faudra prendre en compte la transmittance diffuse de la couche nuageuse pour atténuer la radiance émise depuis le ciel. En graphique, l'approximation généralement faite dans le cas des nuages est de faire le calcul de E^{ciel} sur un point du dessus des nuages, puis de multiplier par

$\frac{T_{ms}}{2H}$ pour diffuser l'irradiance accumulée dessous les nuages [BNL06].

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les notions de base de physique nécessaires à la compréhension du présent mémoire. Nous avons commencé par introduire les généralités des transferts radiatifs régissant le transport de la lumière du soleil dans une scène d'extérieur. Puis nous avons défini les termes qu'il est indispensable de les connaître (L'albédo, la luminance, l'éclairement (illuminance), la réflectance (BRDF), la transmittance (BTDF).....). Nous avons fourni quelques valeurs d'exemple afin de donner une idée de l'importance des différents éléments autour d'un nuage. Ensuite nous avons abordé les modèles physiques de représentation les interactions lumineuses dans les nuages et dans l'atmosphère terrestre pour arriver à exprimer l'équation régissant les transferts radiatifs dans une scène d'extérieur.

Chapitre 5

le rendu des nuages (état de l'art)

Il existe deux principaux moyens de simuler les nuages en synthèse d'images : la première méthode volumique a été étudiée par de nombreuses équipes. La seconde, surfacique, est sensiblement moins poursuivie malgré son intérêt.

De nombreux aspects liés aux nuages sont abordés, de la forme et de la dynamique (mouvement/animation) à l'illumination globale, la couleur du ciel et diffusion anisotrope. De nombreux types de nuages ont été étudiés, et beaucoup de travaux ont été publiés à ce jour.

Cet état de l'art est divisé en trois sections, dans une première section, la modélisation de la forme du nuage est introduite. Puis dans une deuxième section, le rendu du nuage est présenté (certains travaux portent sur les deux aspects à la fois). Nous aborderons ensuite le rendu de l'atmosphère et du ciel.

5.1 Modélisation de la forme

De nombreux travaux existants utilisent la simulation de la physique des nuages pour générer des formes réalistes. Cependant, cette simulation nécessite de nombreuses et complexes équations de la physique des fluides, elle a été simplifiée pour satisfaire les contraintes de rapidité requises pour la synthèse d'images.

Harris et al. [HISL03] simulent de façon relativement précise l'évolution des nuages, comme Stam et al. [FSJ01], mais avec une résolution spatiale décevante eu égard au pouvoir de discrimination de l'œil humain. Les nuages sont modélisés à l'aide des équations différentielles partielles décrivant le mouvement du fluide, des processus thermodynamiques, les forces de flottabilité, et les transitions de phase de l'eau. Il a également simulé l'interaction de la lumière avec les nuages, y compris l'auto-ombrage et la dispersion de la lumière. La figure ci-dessous montre des nuages générés par Harris et al.

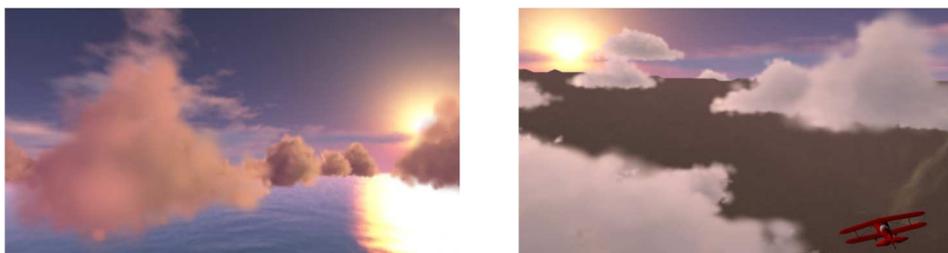


Figure 5.1 – Des nuages générés par Harris et al. « Rendu temps réel ».

Malgré le réalisme du rendu, ce modèle n'est pas assez détaillé pour pouvoir représenter un cumulus.

Dobashi et al. [DKY00] (Figure 5.2(a)) proposent une approche de simulation numérique des nuages pour des applications de synthèse d'images utilisant des automates cellulaires de façon à imiter la façon dont les nuages grossissent et se déplacent.

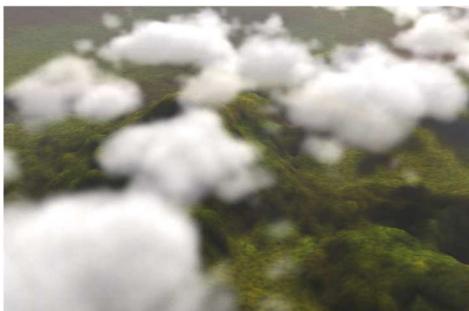
Les originalités de la méthode proposée par les auteurs par rapport aux méthodes précédentes sont d'une part la rapidité relative du rendu (grâce à l'utilisation d'OpenGL) et la modélisation de l'advection par le vent, de la disparition des nuages et des rayons de lumière traversant la couche nuageuse. La méthode de modélisation ne s'appuie pas sur les lois physiques de la mécanique des fluides, mais l'objectif est ici le résultat visuel.

Un gros problème de ce modèle est qu'il n'est pas dynamique, dans le sens où il n'interagit pas avec l'extérieur : il est difficile de prévoir les conséquences du terrain, du passage d'un objet dans l'atmosphère, etc. Ce problème est lié à l'hypothèse faite par les auteurs de ne considérer le vent que sur un seul axe du modèle.

L'avantage est évidemment une simplification substantielle des règles d'évolution des automates : pour prendre en compte des vents dans différentes directions, selon l'endroit où l'altitude, tournants, courants ascendants, etc. Cette limitation entraîne pourtant l'impossibilité de modéliser un nombre de phénomènes intéressants, comme les ouragans, tornades, ou même effets du sol. Et même plus simplement, cela implique que les nuages ne se déforment qu'en longueur : il est impossible d'avoir un nuage qui s'élargit en gardant la même forme.

L'évolution des nuages est très rapide, trop rapide par rapport à la nature : la forme des nuages change, en pratique, assez lentement par rapport à leur déplacement avec le vent, surtout avec un vent sans turbulences. Or ce n'est pas ce qu'ils ont obtenu.

Dans [MYDN01], Miyazaki et al utilisent les Coupled Map Lattice, une technique similaire aux automates cellulaires, mais permettant de simuler la physique des fluides, cependant toujours à une échelle relativement grossière (Figure 5.2(b)).



(a) Des nuages générés par Dobashi et al.



(b) Des nuages générés par Miyazaki et al.

Figure 5.2 – Nuages simulés avec des automates cellulaires (gauche) ou coupled map lattice (droite).

Chapitre 5 : Le rendu des nuages (état de l'art)

La faible résolution de la simulation empêche son utilisation pour des nuages détaillés du type cumulus.

D'autres travaux reposent sur une approche phénoménologique, de façon à obtenir une forme plausible à moindre cout. Ces approches utilisent parfois des éléments de simulation sous la forme de système de particules [SSEH03] (Figure 5.3).



Figure 5.3 – Des nuages générés par Joseph Simons.

Tandis que d'autres préfèrent une approche purement phénoménologique : Gardner [Gar84, Gar85] (Figure 5.4) représente les nuages comme un amas d'ellipsoïdes.



Figure 5.4 – Un cumulus généré par Gardner (un nuage formé par un ensemble d'ellipsoïdes fractals)
« Rendu non temps-réel ».

On peut noter le détail apporté par l'utilisation des textures.

Perlin [Per85a] s'appuie sur un bruit fractal. D'autres auteurs [Ebe97] utilisent des fonctions de forme comme les surfaces implicites.

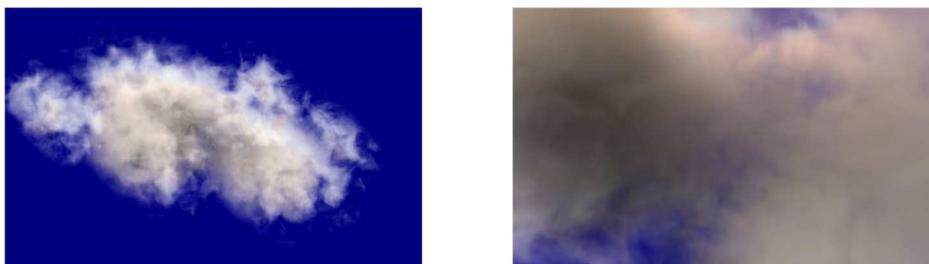


Figure 5.5 – Des nuages générés par Ebert et al « Rendu non temps-réel ».

Notez l'utilisation des fractales pour ajouter du détail au nuage.

Nishita et al. [NND96] combinent des particules agencées de façon hiérarchique et des surfaces implicites : un niveau est construit sur le niveau précédent en discrétisant la surface implicite définie par la dernière couche de particules et en plaçant les particules du niveau suivant de façon égale sur cette surface.

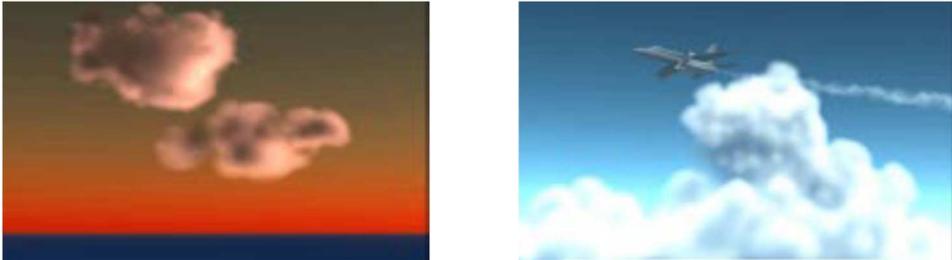
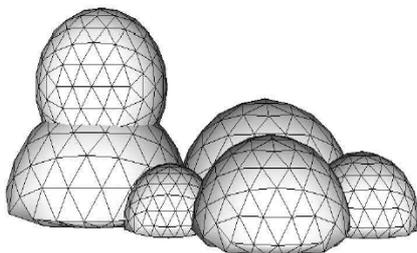


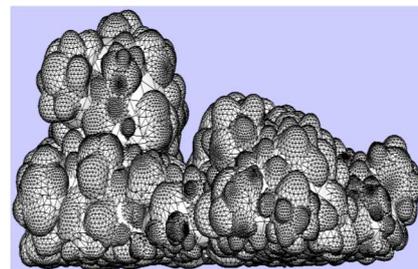
Figure 5.6 – Des nuages générés par Nishita et al, nuages sous différentes conditions d'éclairage.

Bouthors *et al.* [BN04] présentent une méthode de création de la forme du nuage à partir d'une hiérarchie de particules placées sur des surfaces implicites.

Ce modèle est basé sur des particules (ou "blobs") associées à un champ implicite qui permet de définir une surface, utilisée par la suite pour être rendue ou pour servir de surface de base à d'autres particules.



(a) Six blobs définis par l'utilisateur.



(b) Deux niveaux de hiérarchie générés au niveau racine de la figure (a) forment un nuage.

Figure 5.7 – Un nuage cumulus généré par Bouthors *et al.*

D'autres méthodes recréant des formes de nuages à partir des images satellites [DNYO98], ils ont proposé une modélisation des nuages basée image où les nuages réalistes sont créés à partir d'images satellites utilisant des métaballes (Figure 5.8). Dans le procédé proposé, la distribution de la densité à l'intérieur des nuages est définie par un ensemble de métaballes.

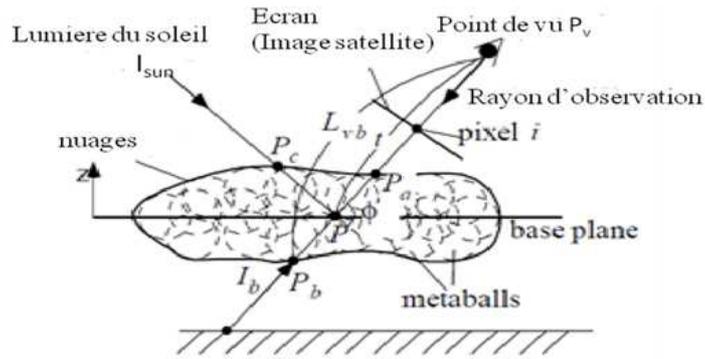


Figure 5.8 – la géométrie des nuages.

D'autres méthodes recréant des formes de nuages à partir des données 2D réelles, de type photographies [DSY10, DOY12].

[DSY10]. Cette méthode capable de synthétiser trois types de nuages: cirrus, altocumulus, et cumulus. Elle calcule l'intensité et de l'opacité des nuages pour chaque pixel à partir d'une photographie d'entrée.

Ils ont utilisé trois représentations différentes pour chaque type de nuage: texture bidimensionnelle pour cirrus, des fonctions implicites (metaballs) pour altocumulus et les données de volume pour cumulus.

Les méthodes physiques donnent des résultats réalistes, mais au prix d'un coût qui doit être compensé par une diminution de la résolution spatiale et/ou temporelle, ignorant ainsi les détails qui donnent aux nuages (et en particulier aux cumulus) leur richesse. À noter que ces détails sont sans doute visuellement plus importants que les valeurs précises de l'intensité. Les méthodes phénoménologiques, quant à elle, permettent d'atteindre à un coup moindre des résultats plausibles et similaires aux méthodes physiques à faible résolution. Elles ne permettent donc pas non plus d'obtenir un résultat ayant la finesse suffisante.

5.2 Rendu du nuage

Un des premiers auteurs à s'intéresser à la simulation des nuages et des milieux participatifs fut Blinn en 1982 [Bli82].

Le modèle présenté simule statistiquement le passage de la lumière à travers un nuage de microparticules. Pour simplifier le problème, Blinn ne s'intéresse qu'à une diffusion primaire de la lumière par les particules.

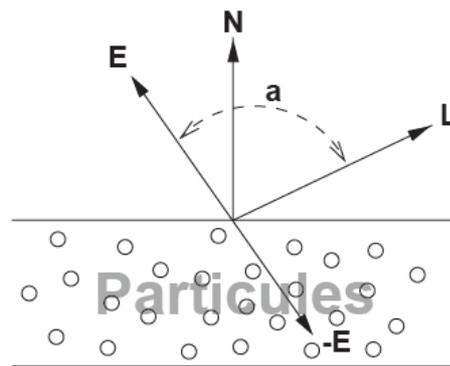


Figure 5.9 – modèle de nuage.

La quantité de lumière émise dans la direction E est calculée à partir de la diffusion par les particules de la lumière provenant de la direction L, mais aussi de la lumière provenant de la direction -E et traversant le milieu (Figure 2.9). Blinn formule ainsi l'intensité de la lumière émise :

$$B = (w/(N.E) \varphi(a) S) + (Tr * Bkg)$$

Avec

w : représentant l'albédo des particules

$\varphi(a)$: la fonction de phase définissant la réflexion de la lumière par une particule en fonction des directions d'éclairage et d'observation. Cette fonction dépend des caractéristiques des particules que l'on veut modéliser.

S : est la probabilité de diffusion liée à l'ombrage et à l'occultation des particules entre elles,

Tr : la transparence représentant la quantité de lumière traversant le milieu sans être arrêtée par les particules

Bkg : la contribution lumineuse de la direction -E.

Le premier terme de cette formule représente la lumière diffusée et le second la lumière traversant le milieu. La fonction de phase peut être très simple pour un milieu parfaitement isotropique $\varphi(a) = 1$ ou plus compliquée dans le cas d'une diffusion de Rayleigh.

Blinn a appliqué ce modèle à la simulation visuelle des anneaux de Saturne. L'auteur remarque cependant qu'un tel modèle de diffusion primaire n'est utilisable qu'avec des particules de faible albédo (les diffusions multiples entre les particules étant négligeables dans ce cas).

Blinn [Bli82] et Max [Max86] ont proposé les premiers travaux pour représenter la réflexion et la diffusion de la lumière à travers les nuages.

En 1984, Kajiya [KH84] développe les travaux de Blinn et propose un modèle plus général de diffusion multiple ainsi qu'une méthode de lancer de rayon permettant de rendre des objets volumiques semi-transparents. Les équations proposées sont assez complexes et le rendu d'un tel modèle peut être très coûteux en temps de calcul. Deux phases permettent de prendre en compte la diffusion multiple : pour chaque voxel du milieu, on calcule la contribution et la diffusion de la lumière, ensuite on déduit la lumière incidente à un point de vue donné en parcourant cette grille 3D. Kajiya présente également un modèle physique intéressant pour simuler la formation de nuages. Ce modèle permet de calculer sur une grille 3D la densité de particules d'eau dans l'atmosphère.

Jim Kajiya et Brian Von Herzen ont proposé deux méthodes pour le rendu des nuages. La première était la méthode "dalle" en deux passes, qui ne représentait que la dispersion simple. La première passe consiste à déposer le flux à partir de la source de lumière dans les voxels de nuages, en tenant compte de l'atténuation par l'opacité de chaque couche. La seconde passe recueille le flux dispersé le long de chaque rayon de vue, en tenant compte de l'atténuation entre l'événement de dispersion et du point de vue. La deuxième méthode étant une application des idées de la dispersion multiple.

Ils ont introduit l'idée du rendu volumétrique (qui ne décrit pas les calculs sur une surface, mais dans un volume).



Figure 5.10 – nuage généré par Kajiya et al.

Blinn [Bli82] et Kajiya [KH84] considèrent soit un albédo faible (la lumière est peu diffusée), soit une densité faible. Dans ces deux cas, seul le single scattering est considéré (on ne prend en compte que les rayons ayant été dispersés une seule fois). Ceci supprime tous les effets dus à la dispersion multiple.

Voss [Voss83] a utilisé une méthode similaire pour produire des nuages fractals dans ses scènes de terrain.

[Kan90] simule également la dispersion anisotrope dans les nuages et le brouillard, y compris un cas de dispersion multiple.

L'approximation de diffusion [Sta95] permet des calculs efficaces, mais néglige l'anisotropie dans la dispersion multiple.

Max [Max94b] a étendu le rendu pour prendre en compte la dispersion anisotrope de la lumière à l'intérieur du nuage, et ainsi obtenir une corolle illuminée lorsque la lumière se situe derrière le nuage. Cette méthode a été par la suite réutilisée, en utilisant des heuristiques basées sur le principe de 'forward scattering' typique aux nuages Nishita [NND96]. En effet, outre la simulation de la diffusion anisotrope multiple par les particules du nuage, il prend en compte la contribution lumineuse de l'ensemble du ciel, de la lumière réfléchiée par le sol et aussi de la diffusion de la lumière par les particules de l'atmosphère avant et après la traversée du nuage (Figure 5.11).

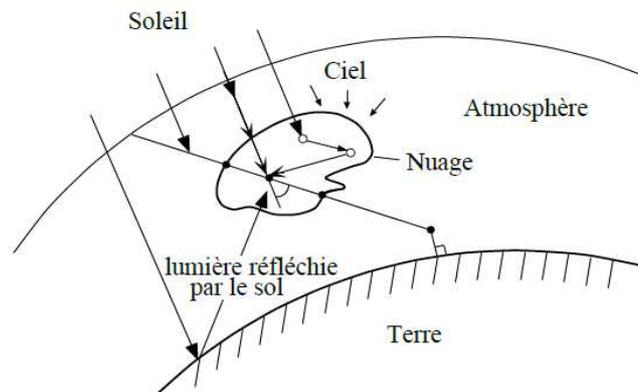


Figure 5.11 – modèle de Nishita pour le rendu de nuages. Les contributions du soleil, du ciel.

Cette méthode utilise une subdivision du volume en éléments homogènes (voxels) pour lesquels l'énergie reçue et émise va être calculée. Les facteurs de forme entre ces éléments de volume sont évalués en tenant compte de la fonction de phase des particules. Cette fonction de phase étant fortement directionnelle, il est possible de réaliser un certain nombre d'approximations et de précalculs destinés à accélérer le processus de résolution. Ainsi, Nishita résout le problème des diffusions multiples jusqu'au troisième niveau.

La forme des nuages est modélisée par des blobs (surfaces implicites) dont la surface est perturbée par une fonction fractale (Figure 5.6). D'excellents résultats ont été obtenus par ce modèle et les auteurs remarquent que ce principe de simulation pourrait aussi être appliqué à la visualisation de la neige.

Puis optimisée en utilisant les possibilités données par le matériel graphique [DKY00, HISL03].

Beaucoup de travaux ont été consacrés à la radiosité volumique en général, en commençant par la méthode zonale par Rushmeier et Torrance [RT87]. Ces techniques et leurs variantes ont parfois été utilisées pour rendre des nuages, comme dans [Ebe97] (Figure 5.5).

Dans le contexte temps-réel, ces volumes sont représentés par accumulation de tranches semi-transparentes (ou billboards), mais cela reste relativement couteux. En effet, si une image est débitée en cent tranches, chaque pixel de l'écran sera réécrit cent fois.

Un autre aspect est d'utiliser les textures, fractales et shaders pour représenter les détails des nuages. Musgrave [EMP94] les a intensément utilisés pour afficher des ciels de nuages.

Voss et Gardner [Vos85, Gar85] ont proposé des modèles empiriques basés sur les textures fractales pour la visualisation de nuages. Par opposition aux modèles physiques, ces méthodes permettent un rendu rapide tout en gardant un réalisme visuel acceptable.

Gardner [Gar84, Gar85] a proposé un modèle particulièrement simple et donnant de bons résultats basés sur des ellipsoïdes texturés dont la transparence est amplifiée à proximité de la silhouette.

C'est à partir du principe des ellipsoïdes texturés déjà utilisés pour les reliefs et les arbres [Gar84] que Gardner construit un modèle pour le rendu de nuages. La modélisation d'un nuage est réalisée par un ensemble d'ellipsoïdes fractals dont les caractéristiques de position, de taille et de texture seront générées par une procédure. Par exemple, dans le cas des cumulus, la forme du nuage résulte de la croissance verticale de colonnes nuageuses à partir d'une carte initiale 2D (Figure 5.4).

La manipulation de ces ensembles d'ellipsoïdes permet de modéliser des phénomènes dynamiques comme l'évolution des nuages ou l'animation de fumée. Ainsi, Gardner utilise un modèle météorologique basé sur le mouvement de bulles d'air pour simuler l'évolution d'une masse nuageuse. Étant donné le matériel disponible à cette époque, cette méthode n'était réalisable que par Ray tracing, interdisant ainsi la possibilité d'un rendu temps réel. Heureusement, le matériel graphique récent permet de définir des pixels shaders, permettant d'espérer adapter cette approche temps réel. Une première tentative a été effectuée par Elinas [ES00]. Neyret [Ney00] a effectué une pré-étude pour améliorer la qualité du rendu en prenant en compte les observations phénoménologiques, mais en gardant un rendu par Ray tracing.

[PAS03] ont introduit l'idée de chemins les plus probables (Most Probable Paths – MPP) dans les milieux participants. L'idée principale est que la majorité des photons arrivant à un point dans une direction ont grossièrement suivi le même chemin. En conséquence, intégrer le transport de la lumière uniquement le long de ce chemin est suffisant pour prendre en compte la majeure partie du transport. De plus [PAT04] accélèrent cette technique et tiennent compte de l'étalement spatial de la lumière autour de ce chemin moyen à travers une formulation analytique. Cette approche a été portée au temps réel [HAP05] en utilisant le matériel graphique pour trancher le volume dans une manière similaire à [HL01, REK04]. Ces méthodes basées sur deux passes de tranchage (accumuler le flux depuis la source de lumière dans les tranches, puis des tranches vers l'œil) limitent la variété de chemins pris en compte.

Comme indiqué dans [PAS03, HAP05], la principale restriction de l'approche MPP est que les chemins qu'elle calcule sont principalement d'ordre élevé et peu courbés.

En conséquence, les chemins d'ordre faible, ainsi que les chemins diffusifs, sont sous-estimés. Ces chemins contribuent à la majorité de la luminance dans les parties fines et dans la rétro dispersion, et ne devraient donc pas être négligés (Figure 5.12).

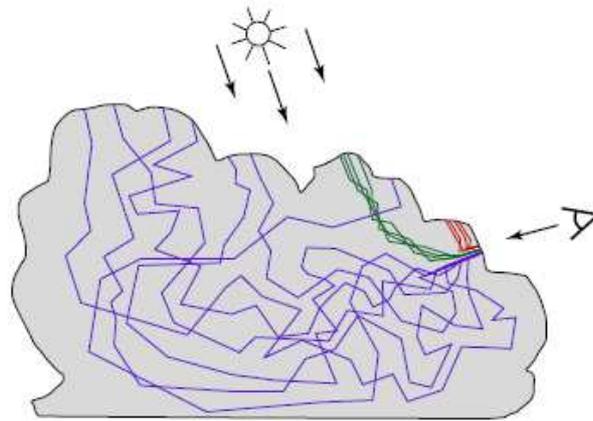


Figure 5.12 – Différents types de chemins lumineux dans les milieux participants, apportés par différents ordres de dispersions.

Les faibles ordres de dispersion apportent des chemins courts et très courbés (en rouge). Les ordres plus élevés apportent des chemins longs et peu courbés (en vert). Les ordres les plus élevés apportent des chemins complexes, très étalés et diffusifs (en bleu). L'approche des chemins les plus probables [PAS03] reproduit les chemins verts, mais sous-estime les chemins rouges et bleus.

Étant donné que les cumulus sont denses et ont souvent une interface nette, ils ont également été représentés par des volumes limités par des surfaces, tels que des ensembles d'ellipsoïdes [Gar85, ES00] ou des maillages.

Bouthors *et al.* [BNL06] simulent le transport de la lumière à l'intérieur d'un maillage, mais ne considèrent aucun enrichissement sur les silhouettes, qui apparaissent ainsi polygonales et opaques. Le travail porte sur le rendu de nuages stratiformes, elle permet un rendu convaincant des nuages (Figure 5.13) et de très bonnes performances (une centaine d'images par seconde).

La dispersion multiple de Mie de la lumière au sein d'un nuage est prise en compte (avec un modèle de Mie modifié permettant de ne traiter que 4 types de dispersion : aucune, simple, double et diffuse), mais aussi les effets lumineux complexes dus à l'interaction du nuage avec son environnement. Leur modèle "physique" de nuage consiste en un ensemble de tranches homogènes contiguës d'une épaisseur fixée, pour lequel la lumière transmise et réfléchi, sont déterminées en fonction du point de vue et de la position du soleil (si l'observateur et le soleil sont du même côté, seules les réflexions sont considérées,

sinon seules les transmissions sont prises en comptes). Un nuage peut être vu de n'importe quel point de vue, mais pas en son intérieur.

Dans ce nuage la lumière est, d'une façon anisotropique, dispersée (dispersion de Mie) plusieurs fois avant de le quitter. Malgré l'effet accumulé des diffusions successives, le caractère anisotropique de la dispersion reste prépondérant, particulièrement le long de la silhouette (silhouettes brillantes ou Silver Lining), et dans la direction de la réflexion pseudo-spéculaire.

Tous les effets visuels que l'on peut observer sur un nuage sont dus directement ou indirectement à la forme particulière de la fonction de phase de Mie .



Figure 5.13 – Résultats des solutions de rendu de nuage de Bouthors et al. : une image issue de Real-time realistic illumination and shading of stratiform [BNL06].

Les nuages sont supposés plans, tout comme le sol (pas de montagnes) ce qui constitue la majeure restriction de ce modèle. Ils ont proposé l'algorithme suivant :

Description de l'Algorithme

Le calcul de l'illumination se décompose en deux parties :

- Le calcul de l'illumination des nuages par les rayons du Soleil.
- Le calcul de l'illumination du sol et du bas des nuages par radiativité.

Illumination des Nuages par le Soleil

Pour calculer l'illumination des nuages par le soleil, Bouthors *et al.* décomposa les ordres de *scattering* en 4 groupes:

- Le non *scattering* qui calcule l'illumination par transparence.
- Le *scattering* simple qui reprend le calcul de Blinn [Bli82].
- Le *scattering* double qui étend le principe de Blinn pour calculer un *scattering* double analytiquement.
- Le *scattering* multiple regroupant tous les termes non calculés.

Calcul de Radiosité

Pour faire son calcul de radiosité, Bouthors utilise l'algorithme suivant. Pour chaque surface (nuage et sol) il utilise deux textures : une texture T contenant l'intensité lumineuse accumulée et une autre dT contenant l'intensité lumineuse sortante.

Tant que les textures d'accumulation ne convergent pas (généralement 2 itérations pour un albédo au sol faible, jusqu'à 8 quand l'albédo au sol est élevé), on fait le calcul suivant :

Pour chaque point de la texture, on utilise les 3 niveaux de Mipmap ayant une résolution de H , $2H$ et $8H$ par pixel de dT (H est la hauteur du sol au nuage). Chaque pixel du centre des niveaux de Mipmap est multiplié par une combinaison des *facteurs de forme* de ces niveaux ce qui donne une approximation de l'intégrale du calcul de l'irradiance .

Dans [BNL06], la base d'un nuage reflète la radiance émise par le sol, car l'albédo d'un nuage est élevé (proche de 1).

Le sol et la base d'un nuage sont considérés plats, horizontaux et parallèles, ce qui n'est pas toujours le cas (grosse limitation). Ils présentent un algorithme sur GPU (*Shaders*) pour calculer les inter-réflexions entre le sol et la base d'un nuage par itérations successives du calcul de radiosité (pour simuler les échanges de lumière entre le sol et le nuage sans la prise en compte de l'atmosphère). À chaque passe (alternativement du sol vers la base du nuage et de la base du nuage vers le sol), et à chaque point du receveur (qui est une texture parallèle) une intégrale sur un hémisphère de la lumière arrivant doit être calculée. Cette irradiance E permet à la fois de mettre à jour la quantité d'énergie lumineuse totale reçue et la quantité d'énergie lumineuse émise à la prochaine itération.

Les textures utilisées pour accumuler l'irradiance reçue et pour déterminer l'énergie émise (en fait réfléchi) à la prochaine itération sont mises à jour à l'aide de cibles de rendu multiples et leurs niveaux de MIP-Map sont générés directement par le GPU. Puisque les inter-réflexions sont basses fréquences, ces textures sont basse résolution et seules quelques itérations sont nécessaires pour le calcul d'une pyramide de texture. Pour le calcul des échanges lumineux pour des terrains typiques (avec un albédo entre 0.1 et 0.2), 2 itérations sont suffisantes pour atteindre le réalisme visuel.

Bouthors *et al.* [BNM08] ont proposé également une nouvelle approche du calcul du transport lumineux, plus rapide, qui ne requiert pas de trancher ou parcourir le volume (ils ont traité les chemins lumineux de tous les ordres). C'est une méthode de rendu pour n'importe quel type de nuage. Elle permet un rendu photoréaliste (Figure 5.14), malheureusement elle est très coûteuse en calculs et n'est pas adaptée pour une scène ayant une échelle plus large que celle d'un seul nuage.

Ils calculent les chemins de *scatter* à partir de surfaces de collection de lumière permettant une estimation du chemin le plus probable à partir d'une étude préliminaire du *scattering* multiple. Mais ces calculs sont très coûteux et ne sont mis en place que pour un nuage.



Figure 5.14 – Résultats des solutions de rendu de nuage de Bouthors et al.. une image issue de "Interactive multiple anisotropic scattering in clouds" [BNM08].

Ils ont utilisé un algorithme simulant interactivement la dispersion anisotrope multiple de la lumière (multiple anisotropic scattering) dans un milieu homogène. Contrairement aux méthodes temps-réel précédentes, ils ont reproduit tous les types de chemins lumineux à travers le milieu et ils ont préservé leur caractère anisotrope.

Cette approche est également inspirée par les études sur le transfert radiatif dans des formes simples telles que les dalles. Ils ont utilisé des représentations adaptées au matériel graphique tel que les depth maps (textures de profondeur) pour implémenter l'algorithme de rendu sur GPU.

Belcour et al [BB09] ont étendu le modèle de rendu de nuages stratiformes de Bouthors *et al.* [BNL06] pour prendre en compte la forme non plane de la Terre. Étant donné que cette méthode fait l'hypothèse d'un sol plat, ils ont réétudié l'algorithme de radiativité entre le bas de la couche nuageuse et le sol. Ils ont donc séparé le travail en deux parties : Modification du modèle plan du nuage en un modèle sphérique, et Étude du modèle de radiativité, qui porte sur l'étude des échanges lumineux entre le bas du nuage et le sol, quand ce dernier n'est pas plat.

Le modèle de nuages de Bouthors [BNL06] proposait un rendu temps réel de nuage en s'appuyant sur la simplification suivante : pour une échelle locale, la terre peut être approchée par un plan. Cette approximation permet bon nombre de simplifications de calculs. Le but du travail de Belcour et al [BB09] étant de faire un rendu temps réel de nuages à l'échelle de la planète, pour cela ils ont modifié ce modèle pour passer d'une Terre plane à une Terre sphérique.

Il décrit comment obtenir une solution analytique à l'équation de *Scattering* dans le cas d'un volume de particules sphériques uniformément réparties.

Il fait l'approximation que la géométrie du volume est dite *slab*, c'est-à-dire que pour tout rayon lumineux entrant dans le volume, la surface d'entrée ainsi que la surface de sortie du volume est plane. La figure 5.15 présente un rayon lumineux entrant dans le *slab* et sortant par la face d'entrée après un *scatter*.

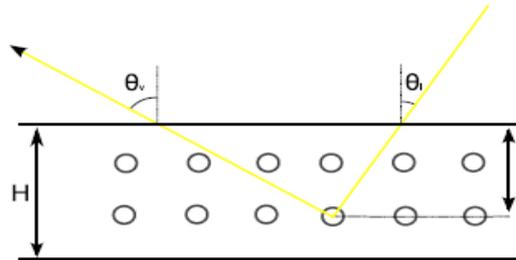


Figure 5.15 – 1-scatter dans une couche uniforme de particules sphériques.

Cette méthode sera reprise par Bouthors [BNL06]. Cependant, elle ne permet de calculer qu'un *Scattering* simple, que s'il permet d'obtenir un arc-blanc et une gloire incomplète ne permet pas d'obtenir une illumination réaliste du nuage (qui serait beaucoup trop sombre avec seulement ce terme). Il est possible de faire un calcul analytique des ordres de *Scatter* plus importants. Bouthors fait le calcul analytique d'un *Scattering* d'ordre 2 [BNL06] en réutilisant le modèle de Blinn [Bli82].

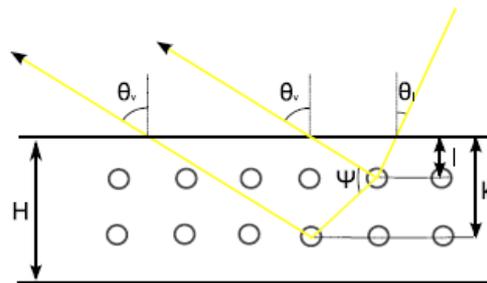


Figure 5.16 – 2-scatter dans une couche uniforme de particules sphériques.

Ce second *scattering* lui permet d'obtenir un arc-blanc et une gloire quasi non atténués. Cependant, il ne permet pas d'obtenir l'illumination complète du nuage, car elle dépend fortement des ordres de *scatters* plus importants.

Dans le cadre des nuages, la surface d'entrée n'est pas plane, mais Bouthors supposa qu'elle l'est localement et utilisa la *fonction de phase de Mie* pour montrer que les faibles ordres de *Scatter* ne s'écartent pas assez pour invalider cette approximation.

Simplification du Nombre de Scatters

Une méthode pour simplifier les calculs de *scatters* consiste à ne prendre en compte qu'un petit ordre maximum de *scatters* (entre 2 et 5). Cette méthode est utilisée par Harris et Lastra [HL01]. Mais elle

reste trop simpliste, car les nuages ont un albédo très élevé (proche de 1) qui rend la diffusion par scatter très importante. Bouthors a montré les ordres élevés de *scattering* ne sont pas négligeables dans l'illumination du nuage [BNM08].

La figure 5.17 présente une vue du sol lors d'un coucher de soleil. Dans cette figure, il n'a pas réalisé le calcul de radiosité pour présenter uniquement les effets visuels de Scattering. On voit bien que l'ancien Shader ne rendait pas le *Silver lining* car il combinait un calcul de radiance du ciel avec la profondeur du nuage. On peut noter dans les deux images des artefacts qui viennent de la faible résolution de la texture de nuage lorsqu'elle est vue depuis le sol.

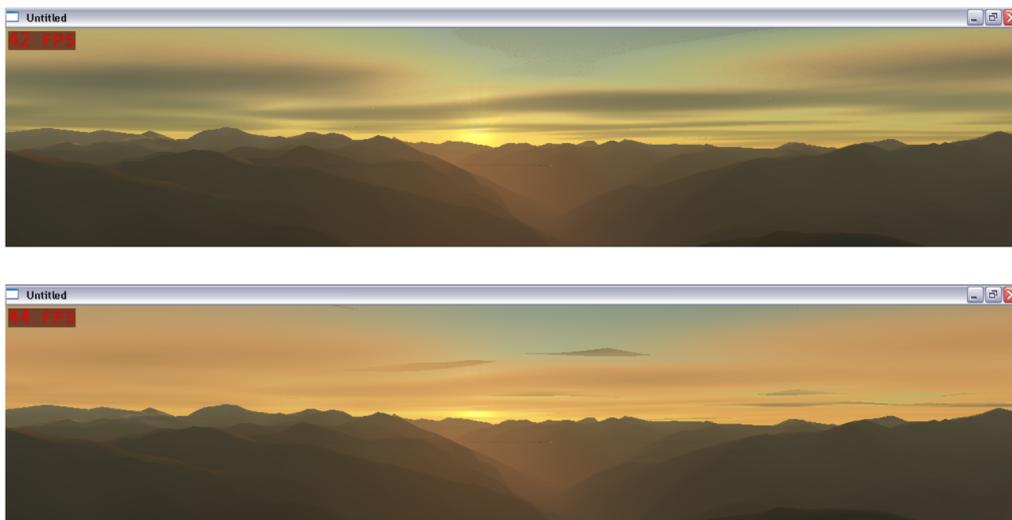


Figure 5.17 – Comparaison entre les deux Shaders (nouveau en haut).

Lors des tests le taux de rafraîchissement des deux méthodes était le même, cela étant dû au fait que le modèle de Bouthors *et al.* contient une majorité de précalculs rendant les calculs très rapides.

La figure 5.18 présente une vue de l'espace, prise lorsque le soleil est de dos à la caméra. On voit sur cette capture d'écran le phénomène de scattering arrière avec un arc blanc et une gloire.



Figure 5.18 – Gloire et Arc Blanc du nouveau Shader.

Dans [EWR12], Elek et al. présentèrent un algorithme interactif de simulation de transport de la lumière dans les nuages. L'exploitation de la haute cohérence temporelle de l'illumination typique et la morphologie des nuages qu'ils ont construite sur un Photon Mapping volumétrique, qu'ils ont modifié pour permettre des vitesses de rendu interactives.



Figure 5.19 – Cumulus congestus et Cirrocumulus altocumulus rendu entièrement dynamiquement 25 et 35 FPS, respectivement.

Les méthodes physiques ont été, pour le rendu, massivement utilisées et améliorées. Cependant, ces méthodes laissent de côté les détails, et les heuristiques utilisées ignorent la connaissance macroscopique disponible pour les cumulus, dont les détails sont importants et dont la dispersion est principalement isotrope. D'autre part, les méthodes utilisant les textures (idéales pour représenter les détails) ont été peu utilisées. Celles-ci manquent de réalisme, et leur application au rendu temps réel n'a pas été profondément étudiée.

5.3 Rendu de l'atmosphère et du ciel

La variation de la couleur du ciel est essentiellement due à la diffusion et l'absorption de la lumière par les particules de l'atmosphère. Deux phénomènes se combinent pour donner sa luminosité et sa couleur au ciel : la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie. La première est provoquée par des particules très petites (de taille inférieure à la longueur d'onde de la lumière incidente) comme les molécules de l'air, la seconde correspond à l'effet de particules plus grosses (de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière) comme les aérosols.

Le calcul exact des caractéristiques d'un ciel est un problème difficile. En effet, il dépend de la diffusion multiple de la lumière du soleil dans les couches de l'atmosphère, mais aussi de l'éclairage indirect induit par la réflexion de la lumière sur la terre. Le phénomène de diffusion est bien sûr dépendant de la longueur d'onde de la lumière et des propriétés globales et locales de l'atmosphère. Nishita [NND96] propose un modèle convaincant pour le calcul de la couleur du ciel.

Dans cette section, nous avons discuté le rendu de l'atmosphère et du ciel. Ce qu'un observateur va pouvoir observer, va dépendre principalement de la densité des composants (molécules d'air, d'ozone, gouttelettes d'eau, poussière, aérosol, ...) de l'atmosphère et de la distance d'observation (profondeur optique) entre l'objet observé et l'observateur.

La couleur du ciel est une indication de référence sur les différentes parties de la journée. Ainsi, la modéliser par une couleur uniforme n'est pas réaliste. La représentation RGB est suffisante pour capturer la couleur du ciel, mais insuffisante pour prédire les véritables couleurs du ciel lors de phénomènes dépendants des longueurs d'onde (arc-en-ciel...).

5.1.1 Prise en compte de la dispersion atmosphérique

La source principale de lumière dans le ciel est évidemment le soleil lui-même. Cependant, le ciel émet aussi de la lumière (indirecte), en tant que résultat de la diffusion atmosphérique et de la réflexion des nuages et du sol. La distribution de la lumière sur l'hémisphère ou dôme visible du ciel dépend des conditions environnementales particulières (humidité, position géographique, saison, ...).

Un modèle physique précis qui décrit la propagation de la lumière dans l'atmosphère est nécessaire pour afficher la couleur du ciel [Slo02].

Pour le rendu de l'atmosphère il y a deux groupes de méthodes, celles qui se limitent à la dispersion simple [NSTN93] et celles qui traitent la dispersion multiple [NND96]. Des méthodes utilisent des couches concentriques avec une densité constante (molécules d'air et aérosols) [NSTN93] et d'autres avec une densité qui décroît exponentiellement avec l'augmentation de l'altitude [REK04]. Ce ne sont pas les seules subdivisions de l'atmosphère proposées [NND96]. Certaines méthodes [NND96 et BN08] précalculent les parties chères en calculs de l'équation du transport de la lumière (comme la transmittance) et d'autres [Slo02] précalculent l'éclairage du ciel (plutôt basses fréquences) et le projettent sur des fonctions de base appropriées hémisphériques/sphériques. Les projections sur des fonctions sphériques comme les harmoniques sphériques pour la radiance spectrale émise depuis le ciel utilisent le fait que la variation de la radiance est localement basses fréquences. Le problème des précalculs est évidemment l'obtention d'une solution statique du point de vue des conditions atmosphériques. Mais l'utilisation du GPU peut accélérer significativement les précalculs [BN08].

5.1.2 Temps clair ensoleillé

Une étude sur la modélisation et le rendu de l'atmosphère d'un ciel clair est accessible [Slo02]. Le rendu de la couleur du ciel clair ensoleillé en temps réel utilise généralement une couleur uniforme, une photographie ou un modèle paramétrique. En fait, le succès des modèles paramétriques résulte dans l'affichage d'une couleur de ciel visuellement plausible en fonction de la position du soleil et en temps

réel (et prenant en compte souvent des conditions climatiques). Ces modèles peuvent être obtenus en limitant le nombre de dispersions et de réflexions ou en utilisant des représentations polynomiales des simulations physiques réalisées [PSS99, HMS05].

5.1.3 Le crépuscule

Haber [HMS05] dans son article prend en compte la diffusion atmosphérique multiple de la lumière du soleil pour la simulation physique du crépuscule. Leur modèle d'atmosphère (réaliste) est composé de molécules d'air (à l'origine de la diffusion de Rayleigh), d'une mixture d'aérosols (à l'origine de la diffusion anisotrope de Mie) et de molécules d'eau. Ils prennent en compte la réfraction de la lumière directe du soleil, le "filtrage" dû à la couche d'ozone ainsi que l'ombre de la Terre. La prise en compte de la réfraction n'est pas justifiée. L'absorption due à la couche d'ozone peut être considérée négligeable [NSTN93], mais [HMS05] sous-entend le contraire. Haber arriva à simuler les nuances subtiles des ciels de lever ou coucher du soleil (qui changent très vite) et cela pour une grande variété de conditions climatiques.

Un autre point intéressant de leur modèle est l'utilisation de deux représentations pour l'atmosphère. Ils utilisent une représentation sous forme de couches qui partagent les mêmes propriétés optiques (humidité, altitude, concentration des composants...) avec approximativement la même quantité de molécules d'air, et une représentation sous forme de cellules sectorielles pour les transferts radiatifs.

Pour rendre correctement les couleurs du ciel du crépuscule, il n'est pas possible de limiter le processus de dispersion à la dispersion simple ou double [HMS05]. Pour le crépuscule, l'illumination indirecte est très importante (car la plus grosse partie visible du soleil l'est depuis les hautes couches de l'atmosphère), ce qui explique la nécessité de prendre en compte la dispersion multiple. Dans [HMS05] l'illumination indirecte est décomposée en une partie anisotrope et une partie isotrope (approximation des dispersions d'ordre supérieur).

5.1.4 Calcul de la contribution directe du ciel

Pour calculer l'illumination directe du ciel (source de lumière diffuse) d'un point p , une intégrale sur un hémisphère doit être calculée, plus précisément une intégrale (irradiance) sur les directions de l'hémisphère où le ciel est visible.

Chapitre 6

Conception

Notre idée est de représenter le nuage par une hiérarchie de sphères ou particules agglutinées les unes aux autres, certaines aplaties à leur base.

Tout d'abord, nous avons besoin de fabriquer cette hiérarchie de particules, ainsi que la surface du nuage sur laquelle nous effectuons notre méthode de rendu. Puis nous devons trouver un modèle d'illumination prenant en compte les caractéristiques d'aspect décrites au chapitre 3 pour reproduire les effets observés: aspect généralement réfléchissant, bords possédant une forte dispersion vers l'avant, sillons agissant comme des pièges à lumière, etc.

Pour ceci, nous nous inspirons du modèle de rendu de Bouthors [Bou04], en reproduisant ces effets, et les applique sur nos formes quasi-sphériques.

6.1 Modélisation de la forme

Si l'on observe un cumulus avec plus d'attention on peut remarquer que sa forme globale est assez homogène et compacte. Cette caractéristique importante permet d'envisager la possibilité de modéliser un nuage du moins dans sa forme, de manière simple, par un ensemble de sphères agglutinées les unes aux autres, certaines aplaties à leur base.

6.1.1 Idée générale

Notre idée est de représenter le nuage comme une hiérarchie de bulles quasi-sphériques ou particules les unes aux autres, certaines aplaties à leur base. Nous avons présenté une méthode de création de la forme du nuage à partir d'une hiérarchie de particules selon les critères observés au chapitre 3.

La figure 6.1 montre une vue abstraite de notre modèle de forme d'un nuage. La figure à gauche montre le niveau racine de ce modèle constitué de quatre particules. La figure au milieu montre des particules créées sur celui-ci (niveau racine). La figure à droite montre qu'un niveau supplémentaire est généré (niveau 1).

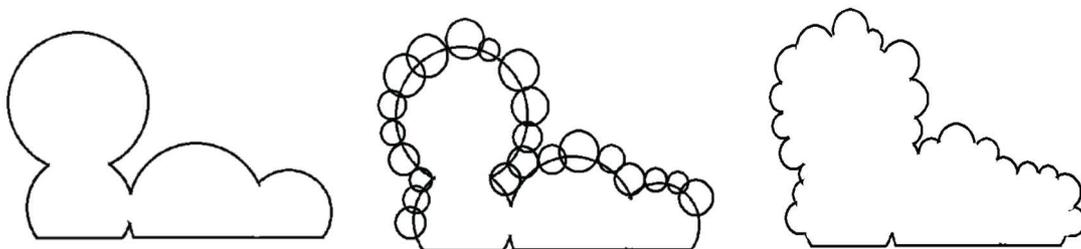


Figure 6.1 – Gauche : Particules du niveau 0 (niveau racine). Milieu : Particules créées sur le niveau 0. Droite : Génération du niveau 1

6.1.2 Notre représentation

Un nuage est composé d'un ensemble de niveaux hiérarchiques définis récursivement les uns sur les autres. Chaque niveau l est constitué d'un ensemble de particules. Chaque particule d'un niveau est définie par sa position, son rayon, son aplatissement (un facteur aléatoirement choisi entre 0.1 et 1).

Les particules du niveau 0 (i.e., la racine), peut se faire de deux manières :

- 1- **Une manière procédurale** : dans ce cas, nous créons un petit nombre de particules placées aléatoirement sur un plan horizontal ou dans une partie restreinte de l'espace.
- 2- **Une manière contrôlé par l'utilisateur** : dans ce second cas, une interface laisse l'utilisateur former et placer les particules racines à la main, lui permettant de créer des formes réalistes de nuage.

Une fois que l'ensemble des particules du niveau 0 est créé, nous pouvons générer une surface que nous utiliserons pour placer les particules du niveau suivant, et ainsi de suite. Le dernier niveau définit la forme du nuage.

Cette représentation très figurative paraît très simpliste, elle donne pourtant une bonne approximation de la géométrie d'ensemble d'un nuage. De plus, il faut savoir que cette géométrie vient s'ajouter un paysage, un ciel réaliste et une texture qui donnera au nuage son aspect cotonneux, ainsi que son comportement à la lumière, i.e la transparence aux bords, les pièges à lumière.

6.2 Rendu

Dans la partie du rendu, Nous nous appuyons sur plusieurs approches que nous combinons et étendons, nous allons tout d'abord nous concentrer sur la solution *du* modèle de nuages proposée par Bouthors [Bou04] *et al* que nous étendrons en s'appuyant sur le modèle de ciel effectué par Nishita *et al* [NDKY00] pour donner un aspect réaliste et crédible au nuage.

Ce modèle proposait un rendu réaliste de nuage en s'appuyant sur la simplification suivante :

- Une couleur du ciel constante et bleu : la couleur du ciel est indispensable pour le rendu des scènes naturelles, cette couleur dans la synthèse d'images est bleu pour des raisons de simplicité. Cette approximation permet un bon nombre de simplifications de calculs au prix d'un coût qui doit être compensé par une diminution de réalisme. Cependant, la couleur du ciel n'est pas simplement bleu.
- Afficher les nuages avec un fond vide, au lieu d'un environnement décent (i.e., au sein par un paysage et un ciel réaliste).

Notre but étant de faire un rendu réaliste de nuages cumulus en temps-réel. Nous allons modifier ce modèle pour passer d'un éclairage ambiant avec couleur constante simplement bleu à une couleur variable qui change en fonction de la direction d'observation, la position du soleil, les conditions de l'atmosphère et la lumière réfléchie par le sol.

Nous utiliserons les notations mathématiques suivantes pour le reste de ce chapitre :

C_s : représente la couleur du soleil

I_v : la couleur du ciel.

Pour un point P donné, \vec{N} représente sa normale, \vec{L} le vecteur unitaire partant de P et se dirigeant vers le soleil, et \vec{O} le vecteur unitaire partant de P et se dirigeant vers l'observateur, comme indiqué sur la figure 6.2.

Nous définissons également la fonction Saturate telle que :

$$\text{Saturate}(x) = \min(1, \max(0, x))$$

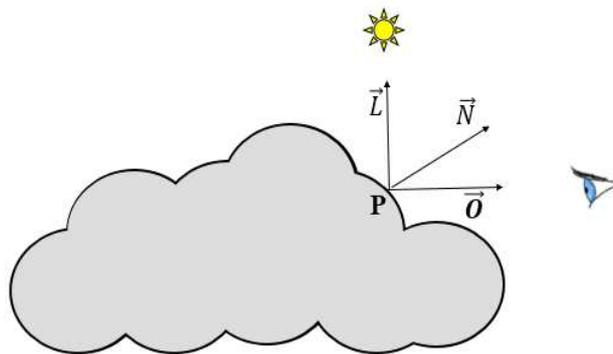


Figure 6.2 – Éléments utilisés dans le calcul de l'illumination d'un point.

6.2.1 L'illumination de base

Les cumulus sont extrêmement denses et épais, ceci implique que la dispersion de la lumière est quasiment isotrope (i.e., la lumière est renvoyée dans toutes les directions), sauf dans la fine couche externe qui sépare le nuage de l'air ambiant, visible sur la silhouette [Ney00].

Puisque la surface du nuage réémet quasiment la même quantité de lumière de façon isotrope, on peut donc appliquer, en première approximation, le modèle de réflexion de Lambert.

6.2.1.1 Modèle basique de Lambert

Les considérations qui précèdent nous encouragent de garder le modèle de réflectivité de Lambert pour la réflexion du nuage en dehors de la corolle, ce modèle décrit comment une surface non brillante est illuminée. Nous commençons donc par simuler ce modèle sur la surface du nuage.

D'après la loi de Lambert, la luminosité d'une surface en un point est directement proportionnelle au cosinus de l'angle entre la normale à cette surface \vec{N} et la direction de la lumière \vec{L} .

Sous forme mathématique, la couleur $I(P)$ au point P est donnée par :

$$I(P) = k_d C_s \text{ saturate}(\vec{N} \cdot \vec{L}) \quad (6.1)$$

C_s : la couleur du soleil.

k_d : le coefficient de réflexion diffuse de la surface ($0 \leq k_d \leq 1$).

θ : l'angle entre la normale \vec{N} et la direction de la source \vec{L} .

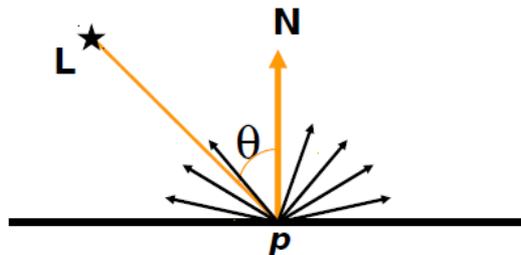


Figure 6.3 – l'illumination d'une surface lambertienne en un point.

L'équation (6.1) constitue donc notre modèle de départ pour le calcul de la couleur du nuage.

Ce modèle sera petit à petit modifié et étendu au long des sections qui suivent de façon à simuler les particularités des cumulus.

6.2.1.2 Eclairage ambiant

Nous ajoutons à notre équation d'illumination un terme dit ambiant, qui représente la lumière ambiante (la lumière provenant de toutes les directions). Elle intègre également la lumière provenant de l'environnement : le ciel, la terre et d'autres nuages. Cette lumière étant réfléchiée également dans toutes les directions. On considère que dans le ciel, la lumière ambiante a quasiment la couleur du ciel.

Dans le modèle de nuages de Bouthors [Bou04] le terme ambiant est un simple constant. Nous allons étendre ce modèle pour passer d'une Couleur simplement bleu à une couleur qui n'est pas constante et qui change en fonction de la direction d'observation, la position du soleil, les conditions de l'atmosphère et la lumière réfléchiée par le sol.

La couleur du ciel est une indication de référence sur les différentes parties de la journée. Ainsi sa modélisation par une couleur uniforme n'est pas réaliste.

La couleur du ciel est déterminée par la dispersion et l'absorption de molécules d'air, les aérosols et les autres petites particules dans l'atmosphère. Par ailleurs, les changements de couleur est en fonction du moment de la journée (la position du soleil). Par exemple, dans la journée, le ciel est bleu, le passage à blanc près de l'horizon. Cependant, au coucher du soleil ou le lever du soleil le ciel devient rouge près de l'horizon. Plusieurs méthodes de calcul de la couleur du ciel ont été proposées [PSS99, NDKY00, BN08].

Nous allons choisi de nous inspirer le modèle de ciel de *Nishita et al* [NDKY00] qui permet d'effectuer un calcul de la couleur du ciel en considérant à la fois la dispersion Rayleigh et la dispersion de Mie. La méthode proposée présente les avantages suivants :

- Calcul rapide de la dispersion simple (dispersion de premier ordre).
- Calcul efficace de la couleur du ciel incorporant la dispersion multiple (compte tenu de la lumière réfléchiée à partir du sol).

Les avantages ci-dessus sont réalisés à l'aide de tables de recherche **look-up** qui sont effectués en utilisant les propriétés géométriques de l'atmosphère autour de la terre.

L'idée de base est que La couleur du ciel peut être déterminée par les facteurs suivants :

(1) La distribution spectrale de la lumière du soleil, les propriétés de dispersion et d'absorption de particules dans l'atmosphère, les conditions de l'atmosphère, la lumière réfléchiée par le sol, la dispersion et l'absorption due à des nuages, et la direction d'observation.

(2) Le facteur le plus important est les propriétés de dispersion de particules (la fonction de phase), qui dépend de la taille des particules et la longueur d'onde de la lumière. L'atmosphère est composée de molécules d'air, des aérosols. La dispersion due aux molécules d'air obéit à la théorie de la dispersion de Rayleigh et de dispersion dû aux aérosols obéit à la théorie de dispersion de Mie, les aérosols ont une forte dispersion vers l'avant.

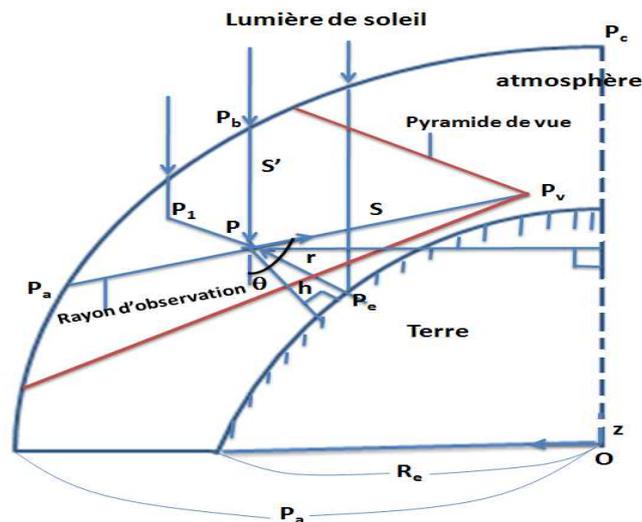


Figure 6.4 – chemins optiques pour le calcul de la couleur du ciel.

(3) L'atmosphère est en forme de coquille sphérique, et la répartition de la densité des molécules d'air et les aérosols varient de façon exponentielle avec l'altitude.

(4) La dispersion multiple n'est pas négligeable, même si la diffusion simple est plus importante puisque l'albédo de l'atmosphère est relativement faible.

En outre, la lumière réfléchiée par le sol est également supposée l'une des facteurs de la dispersion multiple.

Comme le montre la Figure 6.4, la lumière dispersée à un point P sur le rayon d'observation est atténuée à travers l'atmosphère et arrive au point de vue P_v .

Les principaux chemins optiques à P sont les suivantes :

- La lumière du soleil (sunlight) arrive au point P dans l'atmosphère (chemin P_bP).
- La lumière multiple dispersée de la lumière du soleil arrive au point P (chemin P_1P).
- La lumière du soleil (sunlight) après avoir traversé l'atmosphère et être réfléchiée par le sol arrive à P (chemin P_eP).

Fondamentalement, l'intensité de la lumière au point de vue P_v peut être obtenue par intégration de l'intensité de la lumière dispersée par les particules sur le rayon d'observation.

Pour calculer la dispersion simple, il est nécessaire de connaître l'intensité de la lumière atténuée arrivée au P. Cette atténuation est déterminée par la longueur optique entre la partie supérieure de l'atmosphère (P_b sur la figure 6.4) et le point P. Cela nécessite beaucoup de temps car la longueur optique doit être calculée à chaque point d'échantillonnage sur le rayon d'observation.

Pour l'atmosphère de la terre, il est prouvé que la longueur optique depuis le soleil à un point dans l'atmosphère est axisymétrique par rapport à l'axe parallèle à la lumière du soleil (OP_C sur la figure 6.4). Cela rend qu'il est possible de réduire le temps de calcul par pré calculer la longueur optique.

Pour enregistrer le temps de calcul, la profondeur optique est pré calculée et stockée dans une table look-up. Nous appelons cette table par 'table d'ombre'.

Lors du calcul de la lumière du ciel incidente à la terre, le ciel peut être considéré comme un dôme hémisphérique de grand rayon dont le centre étant le point de calcul. Le ciel peut également être considéré comme une calotte sphérique lorsque le point de calcul est dans l'espace. Nous appelons la calotte sphérique une "sky sphere".

Pour la dispersion multiple, on suppose que le centre de la sphère ciel "sky sphere" est au point de calcul sur le rayon d'observation (Figure 6.5), la lumière diffusée à partir de la sphère ciel vers le point de vue peut être calculé. La sphère ciel "sky sphere" est divisé et approché par plusieurs directions. Un nombre fini de directions est suffisant car la distribution de l'intensité directionnelle du ciel vu d'un certain point de calcul dans l'espace ne varie pas de façon drastique. L'intensité totale de celle-ci, cependant, des changements en fonction de l'altitude du point de calcul (ou l'observateur). Nous appelons ces directions 'directions du rayon d'échantillonnage'. Une table look-up pour enregistrer les intensités directionnelles de lumière dans l'espace tridimensionnel est préparée. Nous nous référons à ce tableau comme 'Table de transmission'.

L'atmosphère est subdivisée en voxels de façon que la direction de l'un des bords d'un voxel coïncide avec la direction des rayons d'échantillonnage, l'intensité cumulée (ou transmittance) dans sa direction est stockée à chaque sommet du voxel. C'est-à-dire différentes ensembles de voxels pour les directions d'échantillonnage sont préparés. Avec cette méthode, l'atténuation à un certain sommet peut être facilement calculée progressivement en utilisant le résultat du précédent sommet puisque les points de calcul sont alignés dans la ligne droite dans la direction d'échantillonnage. Cela fait un calcul efficace possible.

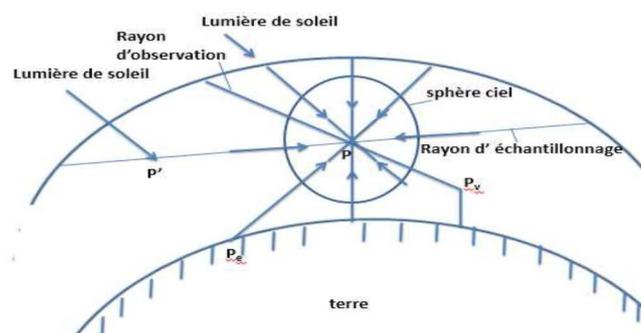


Figure 6.5 – Chemins optiques pour la dispersion du 2ème ordre.

6.2.1.2.1 Méthode de calcul rapide de la dispersion simple

L'intensité de la lumière arrivant au point de vue est la lumière atténuée qui est dispersée au point P, sur le rayon d'observation (Figure 6.4).

La lumière arrivant au point P, est également atténué due aux particules dans l'atmosphère. En tenant compte à la fois la dispersion de Rayleigh et de Mie, l'intensité au point de vue est calculée par l'équation suivante :

$$I_v(\lambda) = \int_{p_v}^{p_a} I_s(\lambda) R(\lambda, s, \theta) \exp(-t(s, \lambda) - t(s', \lambda)) ds \quad (6.2)$$

Avec

$$R(\lambda, s, \theta) = K_r(\lambda) \rho_r(s) F_r(\theta) + K_m(\lambda) \rho_m(s) F_m(\theta) ,$$

λ : est la longueur d'onde.

I_s : est l'intensité de la lumière du soleil en dehors de l'atmosphère.

s : est la distance entre le point P et le point de vue P_v .

s' : est la distance entre le point P et le sommet de l'atmosphère.

K_r et K_m : sont les coefficients pour la dispersion.

K_r est inversement proportionnelle à λ^4 et K_m est proportionnelle à $\lambda^{-0.84}$: les indices "r" et "m" se présentent aux molécules d'air et d'aérosols respectivement.

F_r : est la fonction de phase (la fonction de θ montré dans la figure 6.4) tel que :

$$F_r(\theta) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2\theta)$$

$F_m(\theta)$ a des effets forts de dispersion vers l'avant.

$t(s, \lambda)$: est la longueur optique entre le point P et le point de vue,

$t(s', \lambda)$: est la longueur optique entre le sommet de l'atmosphère et le point P.

t est exprimée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} t(s, \lambda) &= \int_0^s (\beta_r(\lambda) \rho_r(l) + \beta_m(\lambda) \rho_m(l)) dl \\ &= \beta_r(\lambda) \int_0^s \rho_r(l) dl + \beta_m(\lambda) \int_0^s \rho_m(l) dl \end{aligned} \quad (6.3)$$

Avec β_r est le coefficient de diffusion (coefficient d'extinction). β_r est inversement proportionnelle à λ^4 .

ρ_r est la densité au point P et est exprimé en :

$$\rho_r = \rho_{r0} \exp(-h/H_r) ,$$

h : est la hauteur à partir du sol.

ρ_{r0} : est la densité au niveau de la mer.

H_r : est un constant appelé hauteur d'échelle.

Comme l'équation (6.2) ne peut pas être résolue analytiquement, l'équation est discrétisée et calculée par la méthode d'intégration numérique. La longueur optique doit être calculée à chaque point d'échantillonnage (P dans la figure 6.4) sur le rayon d'observation.

Afin de calculer précisément la couleur du ciel, un grand nombre de points d'échantillonnage est nécessaire, ce qui augmente le temps de calcul. Nous abordons ce problème en utilisant les propriétés géométriques de la terre et de la distribution de densité. Une méthode efficace en utilisant la table générée dans le prétraitement est décrit dans la section suivante.

Longueur optique

Considérons les systèmes de coordonnées cylindriques, dont l'axe passe par le centre de la terre et qui est parallèle à la lumière du soleil.

Comme le montre la figure 6.4, soit r le rayon, et z la hauteur depuis le centre de la terre. La distribution de la densité de particules dans l'atmosphère est symétrique par rapport au centre de la terre. Comme la lumière du soleil est une lumière parallèle, la profondeur optique à partir de la partie supérieure de l'atmosphère est axisymétrique par rapport à l'axe des coordonnées cylindriques (OP_C sur la figure 6.4). Autrement dit, les points avec les mêmes coordonnées (r, z) , i.e. l'anneau autour de l'axe, ont la même profondeur optique.

La profondeur optique depuis le soleil peut être exprimée par la coordonnée (r, z) . Comme le montre l'équation (6.2), la profondeur optique est exprimée par deux termes ; molécules d'air et d'aérosols.

d'où
$$t(s, \lambda) = \beta_r(\lambda) T_r(s) + \beta_m(\lambda) T_m(s) ;$$

La partie intégrale de la densité de molécules d'air et d'aérosols sont exprimées par des fonctions T_r et T_m , Respectivement. T_r et T_m sont stockés dans les tables look-up. Nous nous référons à ces tables comme les tables d'ombre parce qu'ils sont utilisés pour l'effet d'atténuation (ou ombre) de la lumière du soleil alors que les densités cumulées sont enregistrés.

Si nous enregistrons les profondeurs optiques dans la table, nous avons besoin des tables pour chaque longueur d'onde parce que la profondeur optique t est en fonction de λ et s . Donc, ils sont divisés en deux composantes. $T_r(s)$ est un tableau à deux dimensions avec le suffixe i et j , qui correspond au rayon r et hauteur z , le paramètre s est une fonction de r et z . Considérons T_r qui représente la densité intégrée

pour des molécules d'air sur un rayon r_i . $T_r(r_i, z_i)$ est l'intensité intégrée à partir du sommet de l'atmosphère jusqu'au point $P_{ij}(r_i, z_i)$, qui peut être obtenue par l'équation cumulative suivante:

$$T_r(r_i, z_i) = T_r(r_i, z_{j-1}) + \int_{z_{j-1}}^{z_j} \rho_r(z) dz \quad (6.4)$$

Où la valeur initiale de l'équation ci-dessus est égale à 0. L'espace existant de l'atmosphère est limitée. Si l'on note le rayon de la terre comme R_e et le rayon de l'atmosphère comme R_a . T est défini dans la plage suivante:

$$R_e^2 \leq r^2 + z^2 \leq R_c^2 \quad (6.5)$$

Si z est négative, T devrait satisfaire $r > R_e$ en raison de la zone d'ombre de la terre. Noter que T est indépendant du point de vue. Alors la table T est calculée une fois, et peut être utilisé comme une base de données. Il suffit de charger leurs valeurs dans le champ de vue. Le champ de vision est la pyramide coupé par l'atmosphère (Figure 6.4).

Dans l'intégration le long du rayon d'observation, l'atténuation de la lumière du soleil à un point d'échantillonnage est calculée par interpolation bilinéaire de la table T . L'intégration est effectuée à partir le point de vue, et l'optimisation suivante est obtenu.

Pour obtenir une précision suffisante, l'échantillonnage à haute fréquence est nécessaire dans une zone à haute densité. Les intervalles d'échantillonnage sont définis de manière adaptative par la fonction de la hauteur. Utilisation des tables d'ombre et l'échantillonnage adaptatif est 6 fois plus rapide que les méthodes précédentes.

Pour le rendu de volume des nuages ou de la fumée, les deux méthodes sont utilisé :

Dans la première méthode, l'atténuation de la source de lumière est calculée à chaque voxel, Dans la deuxième, l'intensité de le rayon d'observation est ré-échantillonné [KH84, EP90].

Leurs méthodes ont besoin des tableaux à trois dimensions pour montrer l'atténuation en chaque voxel, mais notre méthode n'a besoin que d'un tableau à deux dimensions pour l'effet d'ombre. En outre, notre méthode est très efficace en utilisant le traitement de cumul. Cela est parce que nous pouvons utiliser la propriété de distribution de la densité de l'atmosphère.

6.2.1.2.2 Calcul efficace de la couleur du ciel incorporant la dispersion multiple

Nous allons discuter de second ordre de la dispersion dans cette section. Pour le second ordre de dispersion, la lumière du soleil est dispersée à P' incident au point P sur le rayon d'observation, après la lumière diffusée à P atteint le point de vue P_v (Figure 6.5).

La lumière provenant de différentes directions incidentes au point P. Autrement dit, les intensités de toutes les directions w (appelé le rayon d'échantillonnage) doivent être réunies sur P. L'intensité atteinte le point d'observation P_v est I_v, elle est donnée par l'équation suivante (Figure 6.6).

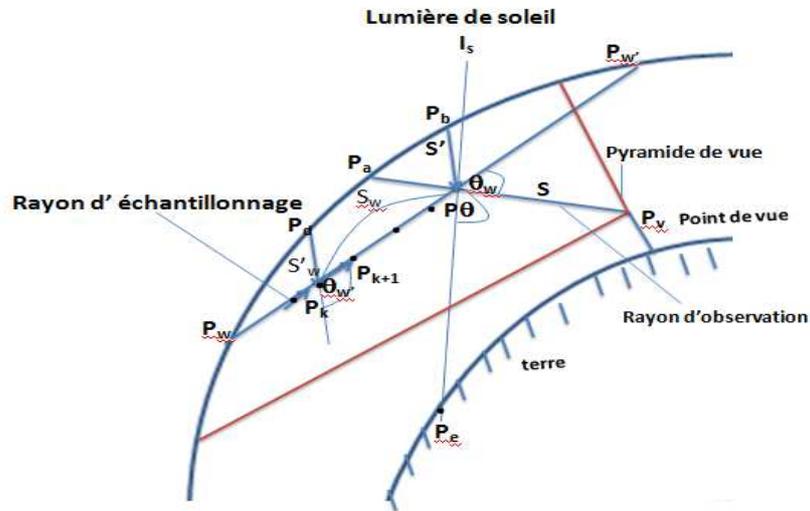


Figure 6.6 – Rayon d'échantillonnage pour la dispersion du 2ème ordre.

$$I_v(\lambda) = I_s(\lambda) \int_{p_v}^{p_a} \left\{ R(\lambda, s, \theta) \exp(-t(s', \lambda)) + \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} dw F(\theta_w) \left(\int_P^{P_w} R(\lambda, s_w, \theta_w) \exp(-t(s_w, \lambda) - t(s', \lambda)) ds_w \right) \right\} ds \quad (6.6)$$

Où le premier terme signifie la dispersion simple, et le second terme est le second ordre de dispersion.

P_w : est le point d'intersection entre la partie supérieure de l'atmosphère et le rayon d'échantillonnage.

θ_w : est l'angle de phase entre le rayon d'échantillonnage et la lumière du soleil.

θ_ω : est l'angle de phase entre le rayon d'échantillonnage et le rayon d'observation.

S_w : est la distance entre le point d'échantillonnage sur le rayon d'échantillonnage et P.

t(s_w, λ) : est la profondeur optique du point d'échantillonnage sur le rayon d'échantillonnage au point P.

Comme le montre l'équation ci-dessus, l'intégration quadruple est nécessaire parce que l'intégration de la profondeur optique est également nécessaire. Comme il est décrit à la section précédente, la lumière incidente au point P est supposée comme la lumière de la sphère ciel dont le centre est P (Figure 6.5). Et la sphère ciel est subdivisée en plusieurs directions appelées les directions des rayons d'échantillonnage.

Pour plus de simplicité, la dispersion due aux molécules d'air est discuté ici. En discrétisant l'incident angle solide en P à M directions, l'équation (6.6) est exprimée par l'équation suivante:

$$I_v(\lambda) = K_r I_s(\lambda) \int_{p_v}^{p_a} F_r(\theta) \exp(-t(s',\lambda)) + \sum_{l=1}^m F_l g_l(s,\lambda) \rho_r(s) \exp(-t(s,\lambda)) ds \quad (6.7)$$

Avec

$g_l(s,\lambda)$: est la fonction de transmission totale de la lumière incidente au point P dans la direction d'échantillonnage D_1 , qui est la transmittance totale de la dispersion de deuxième ordre à partir de chaque point sur le rayon d'échantillonnage (PP_w), et est donnée par l'équation suivante:

$$g_l(s,\lambda) = \int_{p_w}^p R(\lambda, s_w, \theta_l) \exp(-t(s_w, \lambda) - t(s_w', \lambda)) ds_w \quad (6.8)$$

$$F_l = \frac{1}{4\pi} \int_{\Delta w} F(\theta_w) dw$$

Comme il est décrit à la section précédente, la sphère ciel est subdivisée en directions finis. En multipliant l'intensité de la lumière du soleil I_s à l'équation (6.8) nous donne l'intensité totale du second ordre de la dispersion de tous les points sur la direction du rayon d'échantillonnage D_1 .

L'équation ci-dessus $g_l(s,\lambda)$ devrait être calculée à chaque point d'échantillonnage sur le rayon d'observation. Pour calculer g à chaque point d'échantillonnage lors de l'intégration est une perte de temps. Pour enregistrer le temps de calcul, g est précalculée et stockée dans une table: les valeurs de g dans la pyramide de visualisation sont stockées. Ces valeurs sont stockées dans les points du réseau de voxels dont les bords sont parallèles aux directions des rayons d'échantillonnage.

Nous allons dénoter g au point P_k dans la direction D_1 par $G_k^{(l)}$. $G_k^{(l)}$ est la transmission totale due aux particules de P_w à P_k (voir Fig.6.6). Après le calcul de l'intensité diffusée par des particules sur le chemin $P_k P_{k+1}$ et la lumière atténuée en raison de la profondeur optique, $G_k^{(l)}$ au point P_k peut être calculée en ajoutant les deux à $G_{k-1}^{(l)}$; qui est donnée par l'équation cumulative suivante:

$$G_k^{(l)}(\lambda) = \Delta G_k^{(l)}(\lambda) + G_{k-1}^{(l)}(\lambda) \exp(-\tau_k(\lambda)) \quad (6.9)$$

$$\Delta G_k^{(l)}(\lambda) = \int_{p_{k-1}}^{p_k} R(\lambda, s, \theta) \exp(-t(s, \lambda) - t(s', \lambda)) ds$$

τ_k : est la profondeur optique du chemin $P_{k-1} P_k$ et est obtenu quand $\Delta G_k^{(l)}$ est calculé.

S : est la distance entre un point d'échantillonnage jusqu'au P_{k-1} .

s' : est la distance entre le sommet de l'atmosphère jusqu'au point d'échantillonnage.

La table d'ombre est utilisé pour le calcul de $t(s', \lambda)$ dans ΔG_k . En utilisant la méthode ci-dessus, le calcul se fait de manière efficace.

Noter que les valeurs dans la direction opposée sont également stockées parce que les valeurs de la direction vers l'avant (P_w to P_k) sont différents. La valeur de g au point arbitraire P dans une direction D_i peut être calculée par interpolation tri linéaire. Pour les directions des rayons d'échantillonnage, huit directions comme la direction la lumière du soleil, la direction perpendiculaire à la lumière du soleil, la direction horizontale à la surface de la terre, et la direction du zénith sont employés dans le présent document. La diffusion Rayleigh présente les caractéristiques suivantes: la direction de diffusion est plus forte en direction de la lumière du soleil, tandis que la direction la plus faible est perpendiculaire à la lumière du soleil. Par conséquent, ces deux premières directions sont sélectionnées dans notre système.

La lumière réfléchi par le sol peut être calculée comme suit. La lumière réfléchi comporte deux composants ; lumière directe du soleil et de la lumière du ciel. Même si l'albédo du sol dépend des matériaux tels que le sol, les arbres et le sable, nous avons utilisé l'albédo moyen. Le sol est supposée être représenté par la surface de Lambert, et la lumière réfléchi est calculée par utilisation de la loi de Lambert.

Que les valeurs initiales de l'équation (6.9), les intensités de lumière réfléchi à partir du sol uniquement pour les rayons d'échantillonnage qui intersecte la terre (ex, P_e dans figure 6.6). L'intensité du sol a un effet plus important sur les rayons de vision horizontaux, et est plus forte lorsque l'altitude du soleil est élevée.

Nous modifions donc l'équation (6.1) pour y introduire le facteur ambiant :

$$L(P) = \text{saturate}(\vec{N} \cdot \vec{L}) \quad (6.10)$$

$$I(P) = k_a I_v + k_a C_s L(P) \quad (6.11)$$

6.2.2 La corolle du nuage

Nous modifions ensuite notre modèle de façon à simuler l'effet des réflexions (Forward Scattering) se produisant dans la corolle du nuage éclairés par le soleil,

La corolle d'un cumulus a un aspect relativement différent de celui du cœur du nuage. En effet, étant donné la faible densité de particules d'eau au niveau de la surface du nuage, la dispersion cumulée reste principalement dans la même direction et vers l'avant, et non isotrope. Cette corolle est particulière car elle est la seule partie du nuage où la dispersion en avant (ou Forward Scattering) de la lumière a lieu, au contraire des nuages à faible densité où cette dispersion a lieu partout (notons que les nuages diffus tels que les stratus ou les jeunes cumulus possèdent cette propriété en tout point).

Ceci rend les cumulus très contrastes : lorsqu'ils sont illuminés par devant, le corps est intensément blanc et la corolle est relativement transparente, et de la couleur du ciel. Lorsqu'ils sont illuminés par

derrière, le cœur du nuage est extrêmement sombre et homogène, alors que la corolle est lumineuse, grâce au Forward Scattering.

Par exemple dans la figure suivante on voit bien que la bordure du nuage est quasiment transparente et qu'il y a une grande différence d'éclairage entre le bord et le centre du nuage.



Figure 6.7 – corolle éclairée de vrais nuages.

Calcul de la densité

Grace au calcul de la densité nous serons capables de savoir si le point que nous dessinons se trouve sur la corolle.

Nous utilisons ici une technique déjà étudiée par Fabrice Neyret [Ney00]. Cette méthode consiste à appliquer une transparence à la surface en fonction de la densité du nuage se trouvant derrière le point considéré.

Pour cela, nous supposons que nos blobs ont une forme sphérique. Grace à cette approximation, il est très facile de déterminer localement quelle est la position du point P par rapport au blob sur lequel il se trouve. En effet, nous avons accès à la normale \vec{N} de ce point P, et nous savons que pour une sphère, il y a une bijection entre la normale d'un point et sa position sur la sphère, car la normale est le vecteur unitaire partant du centre de la sphère et dirigé vers P.

La normale \vec{N} dans le repère de la camera nous informe donc directement sur la position de P sur la sphère :

- 1) Si cette normale est dirigée vers la camera, P se trouve au milieu du cercle représentant la sphère à l'écran, ce qui veut dire que la droite D partant de la camera et passant par P traverse la sphère de part en part, par le plus long chemin possible à l'intérieur de la sphère.
- 2) Si \vec{N} est au contraire orthogonal à la direction de la camera, ceci signifie que P est sur le contour du cercle représentant la sphère à l'écran, et donc que D ne traverse pas la sphère, mais est tangente à elle.

Grace à la normale \vec{N} , Nous pouvons déduire la longueur traversée par D à l'intérieur de notre sphère de Rayon R_i :

$$l_i(P) = 2 R_i \vec{N} \vec{O} \quad (6.12)$$

Cette longueur va nous permettre de calculer analytiquement l'intégrale de la densité du nuage le long de ce rayon. Mais pour cela, nous avons besoin de savoir comment est organisée la densité à l'intérieur d'un nuage.

Les cumulus ont ceci de particulier qu'ils ont une densité très importante et quasiment constante. En définissant 1.0 comme étant la densité maximale pouvant être atteinte par un nuage, et 0.0 une densité nulle, nous simulons la répartition de la densité à l'intérieur de notre sphère de nuage comme suit : tous les points situés à une distance de moins de $R_i - r$ du centre sont considérés comme ayant une densité de 1.0. Entre $R_i - r$ et R_i , la densité décroît linéairement jusqu'à 0.0. Ceci nous donne donc la densité $\rho_i(P)$ d'un point P :

$$\rho_i(P) = \text{Saturate} \left(\frac{R_i - d_i}{r} \right) \quad (6.13)$$



Figure 6.8 – résultat de la dispersion cumulée sur le cœur du nuage et à la corolle

A partir des équations (6.12) et (6.13), nous avons tous les éléments pour calculer une intégrale analytique de la densité traversée par D. Cependant, pour simplifier encore plus nos calculs, nous allons alléger cette intégrale en assumant que la densité est constante tout au long de D à l'intérieur de la sphère. L'intégration se résumera alors à une simple multiplication, au prix d'un réalisme diminué.

Pour ce faire, de la même façon que nous avons calculé $l_i(P)$, nous pouvons calculer la distance minimale entre la droite D et le centre de la sphère :

$$d_i^{min} = R_i \sqrt{1 - (\vec{N} \vec{O})^2} \quad (6.14)$$

A cette distance minimale d_i^{min} (P) est associée une densité : c'est la densité maximale ρ_i^{max} (P) traversée par D dans la sphère :

$$\rho_i^{max}(P) = \text{Saturate} \left(\frac{R_i - d_i^{min}}{r} \right) \quad (6.15)$$

Nous considérons que tous les points traversés par D dans la sphère possèdent cette densité maximale ρ_i^{max} (P). Ainsi, la quantité $\hat{\rho}_l$ (P) de gouttelettes d'eau traversées par D dans la sphère se résume à :

$$\hat{\rho}_l (P) \approx \rho_i^{max}(P) l_i(P) \quad (6.16)$$

$$\approx l_i(P) \text{Saturate} \left(\frac{R_i}{r} (1 - \sqrt{1 - (\vec{N} \vec{O})^2}) \right) \quad (6.17)$$

Nous avons au final, grâce à ρ , un moyen de savoir où se trouve un point par rapport à la sphère à laquelle il appartient, et surtout quelle est la densité du nuage se trouvant derrière ce point. Vous aurez remarqué que dans cette section, nous n'avons pas du tout modifié le calcul de la couleur $I(P)$ de P proprement dite.

Grace au ρ calculé précédemment, nous sommes capables de savoir si le point que nous dessinons se trouve sur la corolle, et même bien plus puisque ρ nous donne la densité de nuage que l'on traverserait dans le blob sur lequel se trouve P si l'on traçait un rayon partant de la camera et passant par P proprement dite. Cependant, le calcul de ρ décrit ici va beaucoup nous servir dans la section suivante, dédiée à la corolle du nuage.

Nous nous basons sur le travail effectué par Fabrice Neyret [Ney00]. A partir de la densité ρ , nous pouvons calculer la quantité de lumière diffusée par le soleil dans la direction de l'observateur à travers le nuage au point P. En effet, nous assumons que la fonction de phase du nuage est une Gaussienne dont la dérivation standard dépend de la densité traversée. Nous approximations cette Gaussienne par une puissance de cosinus :

$$T_i(P) = e^{-\frac{(-\vec{O}\vec{L})^2}{2\rho^2}} \quad (6.18)$$

$$e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \approx \cos(x)\frac{1}{\sigma^2} \quad (6.19)$$

A partir des équations (18) et (19) :

$$T_i(\mathbf{P}) \approx \cos(-\vec{O} \cdot \vec{L})^{\frac{1}{\rho^2}} \quad (6.20)$$

Nous avons maintenant tous les éléments nécessaires pour calculer la quantité de lumière transmise par la corolle :

$$T_i(\mathbf{P}) \approx \cos(-\vec{O} \cdot \vec{L})^{\frac{k_g}{\rho^2}} \quad (6.21)$$

k_g : un terme nous permet d'ajuster la largeur de la Gaussienne utilisée.

Nous modifions donc l'équation (6.11) pour prendre en compte l'illumination de la corolle :

$$\mathbf{I}(\mathbf{P}) = k_a \mathbf{I}_v + C_s (k_t \mathbf{T}(\mathbf{P}) + k_d \mathbf{L}(\mathbf{P})) \quad (6.22)$$

k_t : un terme permet d'ajuster l'intensité du terme de transmission.

6.2.3 Les pièges à lumière

La lumière réémise par un élément de surface a presque la même énergie que celle reçue (du à l'albédo important). Si cette lumière réémise est reçue par un autre élément de surface, elle augmente de façon significative la quantité d'énergie que ce second élément de surface reçoit et réémet. De cette façon, les inter-réflexions ne sont quasiment pas absorbées, et les concavités sur la surface du nuage (e.g., entre les bulles) agissent comme des pièges à lumière : toute l'énergie reçue est réémise dans un angle solide restreint (plutôt que 2π pour une surface plane), ce qui rend certaines concavités presque aussi lumineuses que le soleil. Ceci donne parfois l'impression que le nuage est illuminé depuis l'intérieur, puisque l'intérieur des sillons semble être bien plus lumineux que la surface autour.

Ce comportement peut aussi survenir, moins intensément cependant, dans les endroits qui ne sont pas éclairés directement par le soleil. D'autre part, ce phénomène se produit quelle que soit l'échelle des concavités.



Figure 6.9 – réflexion amplifiée dans une concavité de la surface

Nous modifions ensuite notre modèle de façon à simuler l'effet des réflexions multiples se produisant dans les sillons du nuage éclairés par le soleil,

Nous savons que les sillons correspondent exactement aux minima locaux de d_{l-1} (la distance de point P à la surface S_{l-1}). Nous allons donc augmenter la luminosité des points possédant un d_{l-1} faible.

$$F(P) = \text{Saturate}(1 - k_d d_{l-1}) \quad (6.23)$$

k_d : contrôle la largeur des pièges à lumière.

- Plus k_d sera important et plus l'intensité ajoutée par $F(P)$ diminuera vite avec d_{l-1} , et donc plus la lumière apportée par les réflexions multiples sera limitée aux creux des sillons.
- Plus k_d est faible, alors les réflexions multiples auront une aire d'effet plus grande.

Seuls les sillons faisant face au soleil sont sur-illuminés, l'augmentation la luminosité dans tous les sillons aurait un effet irréaliste. Lors de la génération de la forme, nous pouvons avoir accès, en même temps que d_{l-1} , à la normale $\vec{N}_{l-1}(P)$ du point de S_{l-1} le plus proche de P. Avec cette information d'orientation \vec{N}_{l-1} on peut déterminer si le sillon fait face au soleil ou non.

$$F(P) = \text{Saturate}(1 - k_d d_{l-1}) \vec{N}_{l-1}(P) \vec{L} \quad (6.24)$$

Comme notre modèle de forme est également basé sur plusieurs niveaux, nous pouvons nous en servir pour prendre en compte ce phénomène à toutes les échelles.

Si d_{l-1} nous indique si nous sommes dans un sillon à un certain niveau, alors, de la même façon, d_{l-2} nous indiquera si nous sommes dans un sillon à l'échelle supérieure, et ainsi de suite.

$$F(P) = \sum_{j=1}^n \text{saturate}(1 - k_d d_{l-j}) \vec{N}_{l-j}(P) \vec{L} \quad (6.25)$$

Finalement, nous modifions l'équation (6.22) de façon à prendre en compte les pièges à lumière, en lui ajoutant le résultat des équations (6.25):

$$I(P) = k_a I_v + C_s (k_f F(P) + k_t T(P) + k_d L(P)) \quad (6.26)$$

6.2.4 L'ombrage

Dans l'étape d'ombrage nous avons utilisé la technique Shadow Mapping [Wil78]. Cette technique consiste à effectuer un rendu du nuage :

1- Depuis le point de vue du soleil : lors de ce rendu, nous calculons la couleur de chaque pixel affiché et la distance de ce pixel par rapport à la camera. Cette distance est enregistrée pour chaque pixel dans un tampon nommé z-buffer.

Le Z-Buffer est un tampon (buffer) qui stocke la profondeur de chaque pixel affiché à l'écran.

Ensuite quand OpenGL demande à dessiner un pixel à un endroit, il compare la profondeur du point à afficher et celle présente dans le buffer. Si le nouveau pixel est situé devant l'ancien, alors il est dessiné et la valeur de la profondeur dans le buffer est mise à jour. Sinon, le pixel était alors situé derrière et n'a donc pas lieu d'être affiché.

Nous enregistrons l'état final du z-buffer dans une texture appelée Shadow map. Ce tampon contient la distance de tous les points visibles depuis le soleil.

2- Depuis le point de vue de l'observateur : lors de ce rendu, nous calculons pour chaque point, sa couleur et sa profondeur par rapport à la camera, et aussi sa profondeur z_1 par rapport au soleil. Nous comparons la valeur de cette dernière avec celle de profondeur z_s de la Shadow map :

Si $z_1 = z_s$, alors ce point est visible depuis le soleil, donc éclairé. Au contraire, si $z_1 < z_s$, ce point n'est pas visible depuis le soleil car il est caché par un autre point plus proche du soleil. Il se trouve donc dans l'ombre.

$$E(P) = \begin{cases} 1 & \text{si } z_1 = z_s \\ 0 & \text{si } z_1 < z_s \end{cases} \quad (6.27)$$

Nous ajoutons à notre équation le terme $E(P)$ de façon à tenir compte de l'ombre :

$$\mathbf{I}(P) = \mathbf{k}_a \mathbf{I}_v + E(P) C_s (\mathbf{k}_f \mathbf{F}(P) + \mathbf{k}_t \mathbf{T}(P) + \mathbf{k}_d \mathbf{L}(P)) \quad (6.28)$$

Chapitre 7

Résultats & Conclusion

7.1 Résultats

Dans cet ultime chapitre, nous détaillons les résultats de l'implémentation de notre travail de recherche effectué lors de ce magistère tout en analysant ces résultats par rapport aux travaux existants. Nous concluons en présentant les recherches possibles pour permettre d'aller au-delà des limitations que nous avons.

Nous avons implémenté la méthode d'illumination des nuages d'Antoine Bouthors en appliquant les modifications que nous avons développées au cours du chapitre 6.

Les images présentées sur les figures 7.1 et 7.2 montrent un nuage avec un niveau racine constitué de quelques particules. La figure 7.1 montre ce niveau racine. Nous avons généré sur celui-ci deux niveaux supplémentaires, résultant en un cumulus montré en figure 7.2.

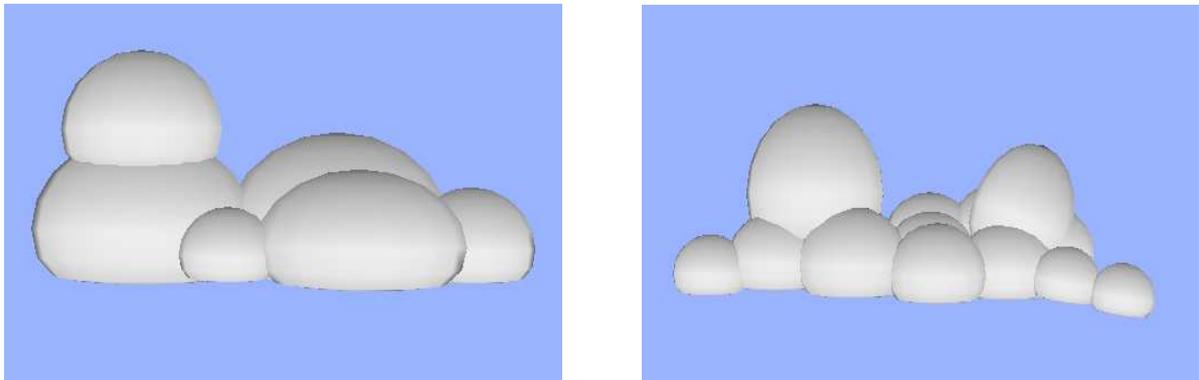


Figure 7.1 – Particules du niveau 0.

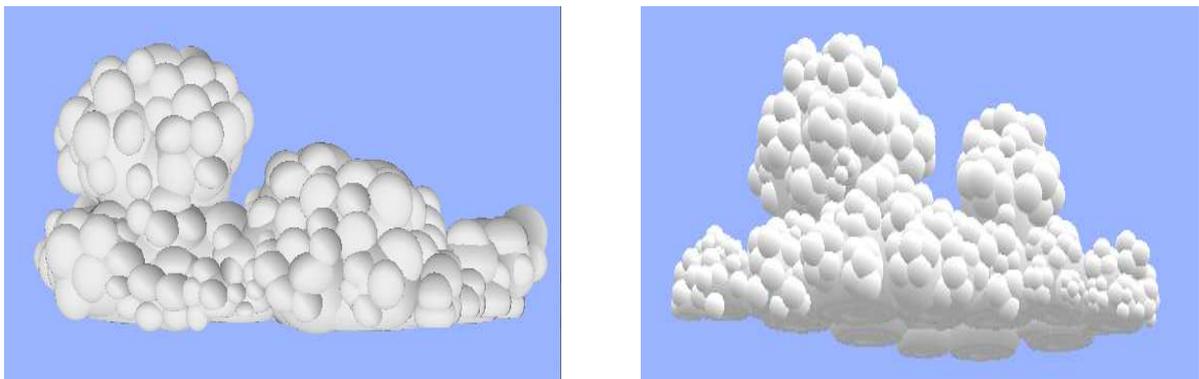


Figure 7.2 – Deux niveaux de hiérarchie générés sur le niveau racine de la figure 7.1 forment un nuage.

Chapitre 7 : Résultats & conclusion

Nos tests ont été effectués sur un processeur i3 à 2.10 GHZ avec une carte graphique Intel (R) HD Graphics 3000, à une résolution de 800×600.

Nos résultats sont illustrés dans les figures 7.3 à 7.8. Ils montrent les différentes caractéristiques attendues, y compris, la forme détaillée, des silhouettes gonflées, des creux lumineux, un contraste fort et un éclairage du ciel et du sol.

La figure 7.3 montre que le nuage est illuminé depuis l'intérieur, puisque l'intérieur des sillons semble être bien plus lumineux que la surface autour (des creux lumineux).

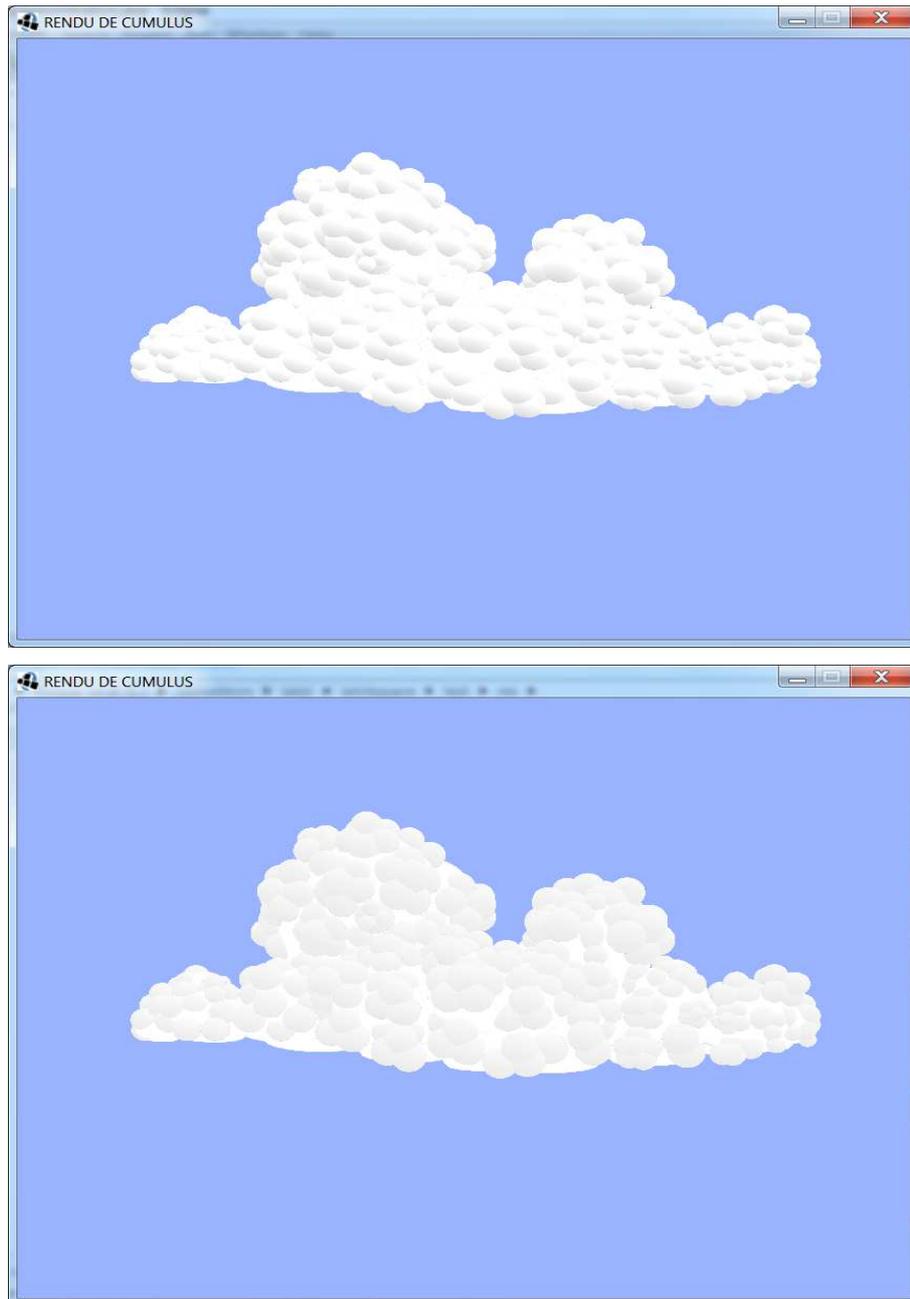


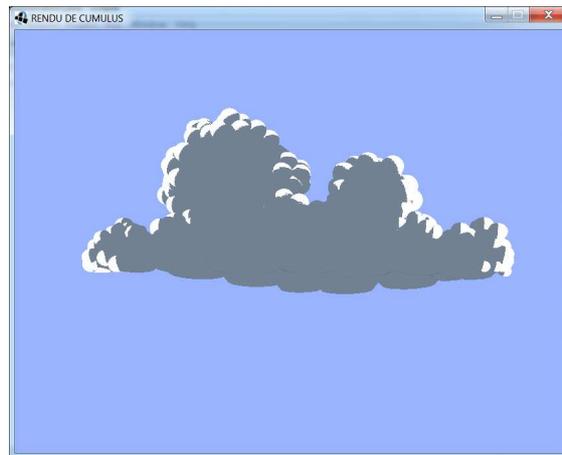
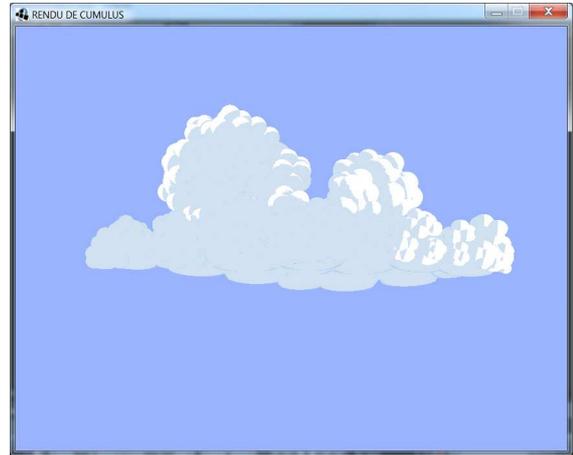
Figure 7.3 – Nuage avec sur-illumination des sillons

Notez la différence entre le corps et la corolle du cumulus (Figure 7.4). Ceci le rend très contrasté: Lorsqu'il est illuminé par devant (Figure 7.4 (a)), le corps est intensément blanc et la corolle est relativement transparente, et de la couleur du ciel.

Lorsqu'il est illuminé par derrière (Figure 7.4 (b)), le corps du nuage est extrêmement sombre et homogène, alors que la corolle est lumineuse.



(a) illumination par devant.



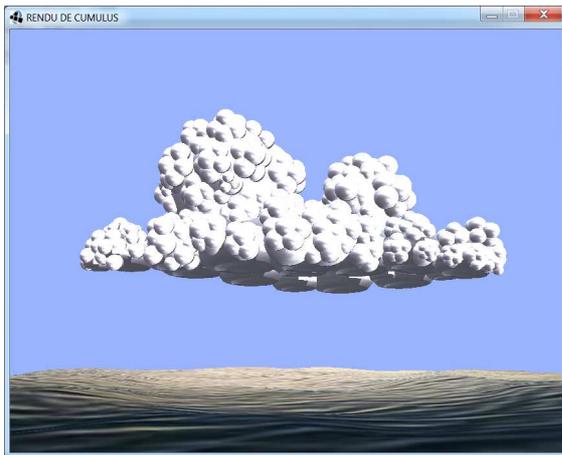
(b) illumination par derrière.

Figure 7.4 – Rendu du nuage avec la prise en compte de l'effet de “silver lining”

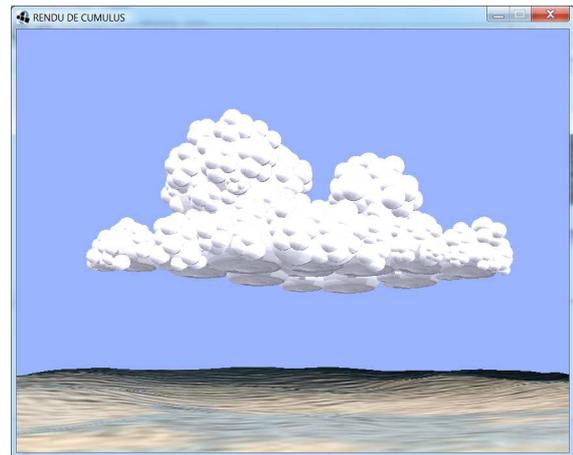
Chapitre 7 : Résultats & conclusion

La figure 7.5 (a) montre comment le nuage est plus sombre au-dessus de la terre. Dans cette figure, nous n'avons pas pris en compte les inter-réflexions sol-nuage. On voit bien que les parties non éclairées du nuage sont totalement noires, ce qui est loin d'être le cas dans la réalité. On peut noter que l'aspect est très peu réaliste.

Après la prise en compte des inter-réflexions sol-nuage (Figure 7.5 (b)), nous avons remarqué que les parties non éclairées ne sont pas complètement noires. Ceci ajoute beaucoup de réalisme.



(a) Sans inter-réflexions.



(b) Avec inter-réflexions.

Figure 7.5 – Notre nuage rendu sans et avec les inter-réflexions sol-nuage.

La figure 7.6 présente une vue du nuage lors d'un coucher de soleil avec deux différents angles du soleil.

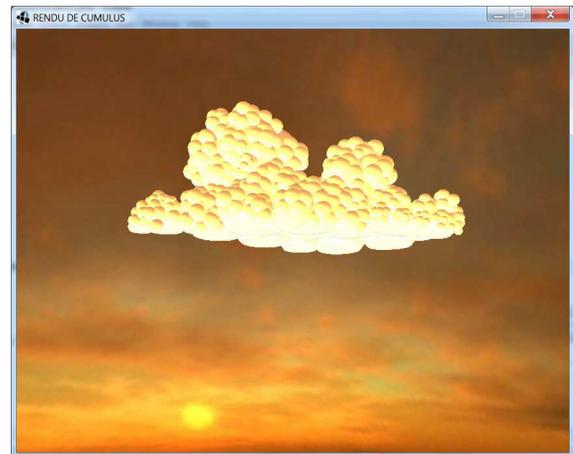


Figure 7.6 – Nuage éclairé par un coucher de soleil.

Dans la Figure 7.7, notez le fort contraste entre les blobs , des parties lumineux éclairés et doux, des parties non éclairées, le fort contraste entre les parties éclairées et non éclairées. Notez également les teintes bleues (contribution de ciel) et brunes (contribution du sol) sur le haut et en bas.

Les couleurs vont du bleu sombre au jaune lumineux, en passant par le rose et le marron. Elles ne sont pas simplement blanches, grises ou noires. Les bords sont nets et gonflés grâce à notre modèle de forme appropriée.

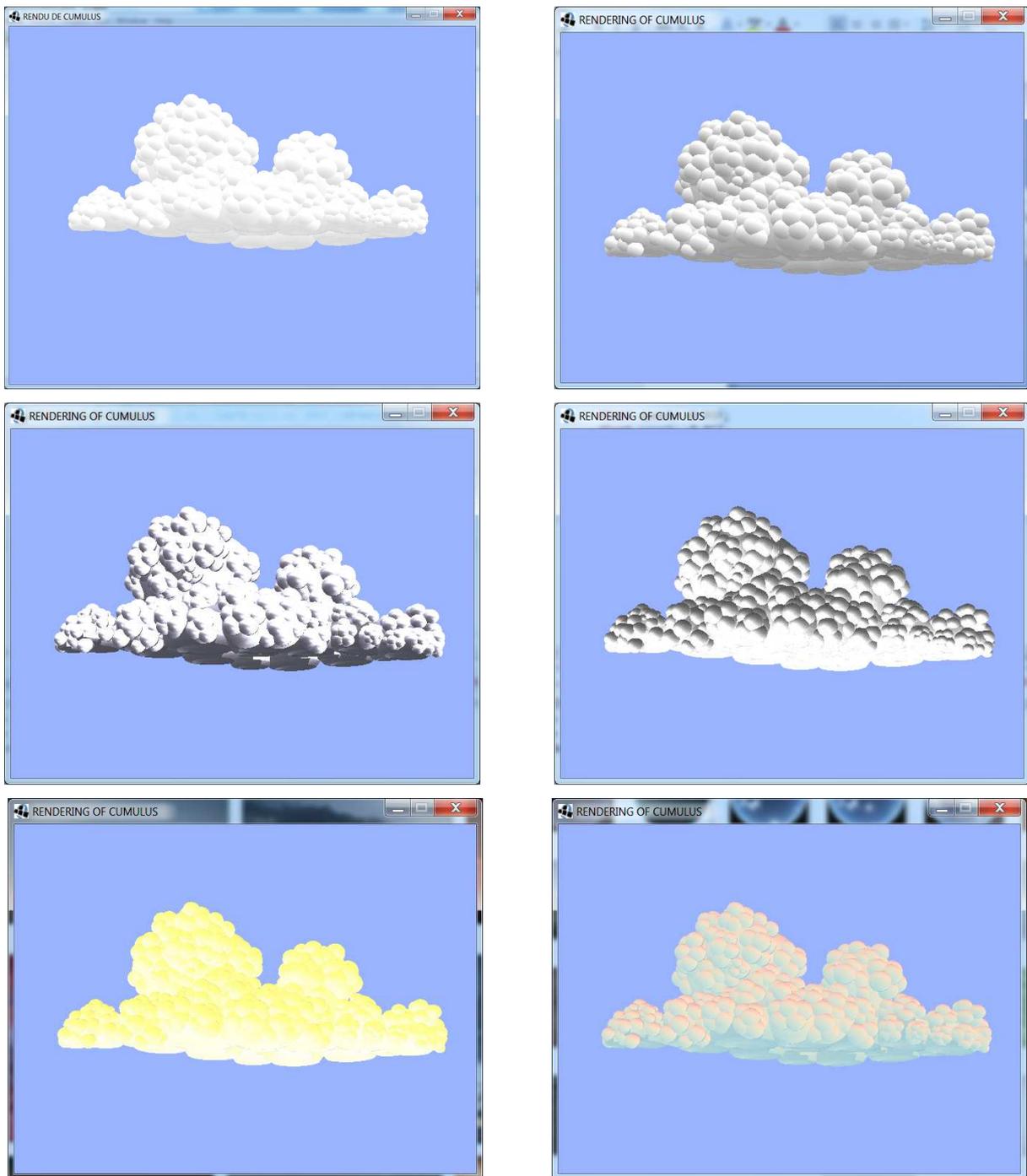


Figure 7.7 – Quelques nuages rendus avec notre modèle final.



(a) Contribution du soleil



(b) Contribution du ciel



(c) Contribution du sol et de la mer

Figure 7.8 – Les différents éléments contribuant à l'image de notre nuage.

Dans la figure 7.8, nous avons affiché notre nuage au sein d'un paysage et un ciel réaliste. Nous avons pris en compte la contribution du ciel et celle du sol pour l'illumination de notre nuage.

Notons comment le nuage montre des teintes bleues due à l'illumination par le ciel (Figure 7.8 (b)).

La terre herbeuse et la mer reflètent la lumière du soleil et brillent sur les nuages, donnant leurs teintes vertes (Figure 7.8 (c)).

7.2 Vitesse et qualité de rendu

Dans le modèle de Bouthors [Bou04], les performances sont relativement faibles par rapport à celles que nous obtenons. En effet, sur notre implémentation, le rendu de nuage est réalisé en temps réel à plus de 30 images par sec, pour un maillage de 1 000 triangles en moyenne (pour chaque particule), et environ de 2 000 textures lu à chaque page pour rendre notre nuage. C'est un nombre important et il est en fait étonnant que nous atteignons des vitesses temps réel.

Notre méthode a été implémentée sous le langage de programmation JAVA. Ce choix est justifié par les différentes qualités que procure cet environnement comme la rapidité et la portabilité. De plus, l'environnement intègre comme support de la bibliothèque graphique OpenGL. Notre méthode a permis de visualiser en temps réel le rendu du nuage et reproduisant la plupart des caractéristiques visuelles des nuages. La principale limite de ce modèle est qu'il est restreint aux nuages cumulus.

Notre modèle (chapitre 6) est simple, efficace et conçu pour les nuages cumulus. Il repose sur une représentation surfacique de la forme des nuages.

Il permet de reproduire les aspects les plus importants de la forme des nuages cumulus :

- l'aspect de ses contours (des chemins courbés circulaires, avec des parties convexes lisses et des angles concaves nets).
- Un ensemble multi-échelle de bulles empilées.
- Un cœur très dense.
- Un fond plat (la partie basse des cumulus).

Il permet aussi de reproduire la plupart des caractéristiques visuelles des nuages cumulus :

- Cœur fortement réfléchissant
- Un côté éclairé détaillé, contrasté et lumineux, un côté non éclairé sombre et doux, des bords lumineux et contrasté lorsqu'ils sont vus du dessous et sombres lorsqu'ils sont vus du dessus, des creux lumineux, ... etc.
- Afficher les nuages dans un environnement décent (i.e., au sein d'un paysage et un ciel réaliste).

- Prendre en considération l'environnement lumineux complet d'un nuage, i.e., non seulement le l'ensoleillement, mais également la contribution du ciel et celle du sol (l'illumination par le ciel et le sol), ainsi que des inter-réflexions entre le sol et les nuages.

Quand même, certaines des caractéristiques visuelles des nuages ne sont pas entièrement reproduits par notre méthode et nécessitent autres recherches.

Nous n'avons pas abordé les inter-réflexions entre les nuages, et entre les différentes parties de nuages que nous croyons d'être la cause des creux lumineux de nuages. Nous n'avons pas identifié certains effets tel que : la gloire et l'arc-en-nuage. Nous ne traitons pas l'auto-ombrage (l'ombre des nuages sur eux-mêmes). En outre, l'interaction avec un sol non plat n'a pas encore été traitée. Nous ne considérons pas la perspective aérienne.

7.3 Etude comparative

Dans le but de mieux positionner notre modèle par rapport aux travaux de référence cités dans le chapitre 5, nous proposons ici une base de comparaison axée sur les principales techniques et moyens de simuler les nuages en synthèse d'images. Nous avons donc réalisé une étude comparative basée sur différentes techniques de rendu du nuage selon les trois axes suivantes :

- Représentation de la forme,
- Génération de la forme,
- Méthode de rendu.

7.3.1 Représentation de la forme

Comme nous l'avons vu dans l'état de l'art (chapitre 5), il existe dans la littérature deux nombreux moyens permettant de représenter les nuages en synthèse d'images : la méthode volumique et la méthode volumique surfacique.

La méthode volumique a été étudiée par de nombreuses équipes [KH84, Ebe97, DKY00, HISL03]. Bien que les résultats des nuages obtenus apparaissent très réalistes, ces méthodes ne sont pas assez détaillées pour pouvoir représenter un cumulus, et aucune méthode volumique proposée à ce jour ne permet de représenter ce phénomène dans son intégralité et sa diversité.

La méthode surfacique [Gar85, Ney00, Bou04] cherche à simuler le plus fidèlement possible ces phénomènes par l'utilisation d'un maillage de surface (ensemble connecté de polygones), surfaces implicites...etc. Cette méthode donne des résultats réalistes, cependant, elle est sensiblement moins poursuivie malgré son intérêt.

Notre représentation est basée sur la méthode surfacique, elle consiste, à représenter le nuage par une hiérarchie de sphères agglutinées les unes aux autres, et à discrétiser la surface de chaque sphère en la découpant en un maillage triangulaires.

7.3.2 Génération de la forme

Il existe deux grandes approches pour la modélisation et le rendu des nuages : L'approche procédurale et l'approche basée sur la physique.

L'approche basée sur la physique [KH84, HISL03] utilise la simulation de la physique des nuages pour générer des formes réalistes. Cependant, cette simulation nécessite un coût élevé de calcul et leur application au rendu temps réel n'a pas été profondément étudiée. Malgré le résultat réaliste de ces modèles, ils ignorent les détails qui donnent aux nuages (et en particulier aux cumulus) leur richesse.

Les autres travaux de la simulation physique que nous avons présenté dans l'état de l'art [DKY00, MYDN01] génèrent des formes encore floues comparées à de vrais cumulus. La faible résolution de la simulation empêche son utilisation pour des nuages détaillés du type cumulus.

L'approche procédurale [Gar85, SSEH03, Ebe97] génère des nuages en utilisant des règles simples. D'autres méthodes procédurales consistent à modéliser les nuages en utilisant des approches phénoménologiques plutôt que des simulations physiques. Puisque les nuages sont soit sous la forme de couches (stratiformes) ou des amas de molécules (cumuliformes), ces approches modélisent généralement les nuages par des plans 2D [Gar85,Max86], des champs de hauteur [Max94a], un ensembles d'ellipsoïdes [Gar85, ES00, Ney00].

Puisque ces ellipsoïdes sont seulement des descriptions grossières, ces approches [SSEH03, Ebe97] ajoutent des détails plus fins pour compenser leur faible résolution via des générateurs automatiques de bruit procédural comme le bruit Perlin [Per85a] ou le bruit de Fourier [Gar85].

Nous avons choisie l'approche phénoménologique pour générer la forme de notre nuage, elle consiste à essayer de reproduire une série de caractéristiques macroscopiques du phénomène étudié plutôt que d'en simuler les causes microphysiques.

Grâce aux textures, fractales et shaders, notre approche permet de générer des nuages réalistes, et de représenter les détails aux nuages avec un coût de calcul très faible.

7.3.3 Méthode de rendu

Il existe plusieurs approches pour le rendu des nuages :

Les méthodes du rendu volumique (qui ne décrit pas les calculs sur une surface, mais dans un volume), elles cherchent à simuler le plus fidèlement possible les interactions de la lumière qui se déroulent au sein d'un nuage. Elles arrivent ainsi à simuler le passage de la lumière à travers un nuage de microparticules. Cependant, les images qui en résultent ne sont pas très réalistes. Les équations proposées sont assez complexes et le rendu d'un tel modèle peut être très coûteux en temps de calcul.

Les méthodes utilisant des billboards ou des tranches de volume [HISL03, HL01, REK04], ces méthodes basées sur deux passes de tranchage (accumuler le flux depuis la source de lumière dans les tranches, puis des tranches vers l'oeil) limitent la variété de chemins pris en compte.

Malgré le réalisme du rendu des autres modèles volumiques que nous avons présenté dans l'état de l'art, ces modèles laissent le côté détails, qui donnent aux cumulus leur richesse.

Dans notre méthode de rendu, nous avons utilisé un maillage triangulaire pour représenter le volume, et les Shader pour représenter les détails aux nuages et pour obtenir un rendu temps réel.

7.3.4 Bilan

Notre modèle montre une approche du rendu de nuage de façon rapide et réaliste. Il a pour but de répondre à certains manques des modèles existants, en particulier le modèle de Bouthors [Bou04], tels que éliminer les trous qui apparaissent dans la surface du nuage, éliminer la partie des blobs se trouvant à l'intérieur du nuage (la partie non visible) et afficher les nuages avec un environnement décent (i.e., au sein par un paysage et un ciel réaliste). Pour atteindre ces objectifs, nous avons utilisé d'autres mécanismes simulés de manière très réaliste dans les autres modèles.

Notre choix était de représenter le nuage par une surface [Gar85], en utilisant des primitives sphériques agglutinées les unes aux autres, placées d'une manière hiérarchique [NND96], et découpées en un maillage triangulaire inspiré de celle de Bouthors [Bou04]. L'aspect volumique est figuré par le modèle de rendu (les caractéristiques d'illumination), et par l'utilisation des textures procédurale.

Nous avons des textures procédurales pour donner au nuage son aspect cotonneux, ainsi que son comportement à la lumière (la transparence aux bords, les pièges à lumière). Nous avons aussi utilisé des ellipsoïdes texturées [Gar85] et des shaders pour représenter les détails aux nuages.

Malgré la géométrie rendue est une surface, les images générées ont montré qu'il donne une illusion très convaincante d'aspect volumique.

Chapitre 7 : Résultats & conclusion

Pour résumer les caractéristiques de notre modèle, nous allons présenter succinctement les deux tableaux suivants :

	Représentation de la forme	Génération de la forme	Méthode de rendu	Vitesse de rendu
Kajiya [KH84]	Volume	Simulation	Rendu volumiques	Lent
Harris [HISL03]	Volume	Simulation	Tranchage	Temps réel
Ebert [Ebe97]	Volume	Procédurale Simulation	Rendu volumiques	Lent
Nishita [NND96]	Volume Surface	Procédurale Implicite hiérarchique	Maillage Lancer de rayon Rendu volumiques	Lent
Gardner [Gar85]	Surface	Procédurale	Maillage Lancer de rayon	Lent
Notre approche	Surface	Procédurale hiérarchique	Maillage Lancer de rayon Shader	Temps réel

Table 7.1 – Comparaison de quelques approches avec la notre

Rendu de nuage	Couleur du ciel	Environnement	vitesse	Maillage	surface
[Bou04]	Constante (bleu)	Fond vide	Lent	Maillage exhaustif (triangulation coûteuse)	Avec trous
Notre méthode	N'est pas Constante	un paysage et un ciel réaliste	Temp réel	Maillage réduit	Sans trous

Table 7.2 – Comparaison de notre approche avec celle de Bouthors [Bou04].

Le maillage par la méthode précédente [Bou04] crée des trous dans la surface de nuage. On peut remarquer que ce problème est résolu par notre méthode, ceci est dû à l'amélioration de la façon utilisée par Bouthors pour implémenter son programme.

Nous avons aussi éliminé la partie des blobs se trouvant à l'intérieur du nuage (la grande partie de notre géométrie) parce qu'elle est totalement non visible et donc inutile. Ceci permet de réduire un grand nombre de triangles qui est en grande partie responsable de la lenteur du rendu.

7.4 Conclusion et Perspectives

7.4.1 Conclusion

Dans ce mémoire, nous avons proposé un modèle simple et efficace (chapitre 6) permettant de rendre de façon rapide et réaliste les nuages cumulus. Ce modèle se base sur une méthode phénoménologique permettant de réaliser un modèle de forme et d'aspect visuel de cumulus à partir d'observations de scènes réelles. Cette méthode consiste à essayer de reproduire une série de caractéristiques macroscopiques du phénomène étudié plutôt que d'en simuler les causes microphysiques.

Dans ce présent rapport nous nous ne sommes pas intéressé à d'autres types de nuages qu'il serait bon de pouvoir les rendre pour augmenter le réalisme. Dans le cas des stratus et autres nuages, il faudrait surement changer le modèle géométrique et donc la méthode de rendu.

Finalement, nous pensons que le rendu de cette surface donne des résultats au moins aussi réalistes que les modèles précédents, à une vitesse temps réel.

7.4.2 Perspectives

A partir de nos résultats, on peut donc dégager un certain nombre d'idées de travaux permettant d'avancer vers notre objectif qui est le rendu réaliste du nuage, avec une vitesse d'affichage temps réel. La principale limite de ce modèle est qu'il est restreint uniquement aux nuages cumulus. Nous devons donc trouver un modèle géométrique adapté à tout type de nuage.

Notre modèle de forme n'est pas une surface unique mais un ensemble des blobs. Ceci rend difficilement l'ajustement des paramètres pour créer le type de nuage désiré. En plus, ce modèle repose sur une triangulation statique d'une surface (nombre de triangles fixe), ce qui n'est pas pratique.

Notre prochain modèle de forme de nuage devra donc être une surface unique, avec une triangulation de surfaces adaptative : Le nombre de triangles à afficher devrait être inversement proportionnel à la distance entre l'observateur et notre scène. Si la scène se trouve loin de l'observateur, le nombre de triangles à afficher devrait être encore plus réduit. Il convient donc de choisir de meilleures modèles de triangulation, l'idéal étant d'utiliser une solution de triangulation dynamique tel que [BN07].

Une perspective intéressante pourrait être de pouvoir générer une forme de nuage à partir de données 2D réelles de type photographie. Il devrait être possible d'utiliser la méthode proposée par Dobashi et al. [DSY10] pour générer une forme de surface de nuage. Ceci permettrait d'obtenir des nuages réalistes et similaires aux nuages réels.

Notre modèle fait l'hypothèse que nos blobs sont sphériques, et que la densité ρ est constante à l'intérieur du blobs et nulle en dehors du blobs, pour des raisons de simplicité. Cependant, en réalité, les blobs ne sont pas sphériques et la densité n'est pas constante, il serait bon d'améliorer ces approximations.

La technique d'ombrage utilisée ne permet pas de projeter des ombres douces ou partielles (un point est toujours soit totalement dans l'ombre, soit totalement dans la lumière). Elle n'applique que des ombres dures, ce qui n'est pas très plausible pour un nuage. Une grande amélioration dans la technique d'ombrage peut être possible aurait pour effet de rendre la transition entre la corolle illuminée et le cœur sombre moins marquée.

Au niveau de la sur-illumination des sillons, nous obtiendrions de bien meilleurs résultats si nous prenions en compte les inter-réflexions entre les nuages, et entre les différentes parties de nuages plutôt que d'utiliser une astuce telle que la nôtre.

Le rendu réaliste d'un ciel nuageux exigerait de meilleurs modèles pour le rendu de l'atmosphère et d'autres phénomènes atmosphériques tels que la pluie et la neige.

Toutes ces idées donnent des poignées sur lequel un développeur peut agir pour ajuster le rapport entre la qualité et la vitesse de rendu. La résolution de ces problèmes permettrait de faire de nombreuses améliorations en faveur des performances de l'application.

Bibliographie

- [BB09] Laurent Belcour and Eric Bruneton. Rendu Temps-Réel de Nuages à l’Echelle Planétaire. Master’s thesis, Institut National Polytechnique, Grenoble, 2009.
- [Bli82] James F. Blinn. Light reflection functions for simulation of clouds and dusty surfaces. In Proceedings of the 9th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, volume 16, pages 21–29, July 1982.
- [BN04] Antoine Bouthors and Fabrice Neyret. Modeling clouds shape. In Eurographics (short papers), August 2004.
- [BN07] Antoine Bouthors and Matthieu Nesme. Twinned meshes for dynamic triangulation of implicit surfaces. In Graphics Interface, Montréal, may 2007.
- [BN08] Éric Bruneton and Fabrice Neyret. Precomputed atmospheric scattering. In 19th Eurographics Symposium on Rendering, EGSR08, volume 27 (4), pages 1079–1086, June 2008.
- [BNL06] Antoine Bouthors, Fabrice Neyret, and Sylvain Lefebvre. Real-time realistic illumination and shading of stratiform cloud . In Eurographics Workshop on Natural Phenomena, September 2006.
- [BNM08] Antoine Bouthors, Fabrice Neyret, Nelson Max, Eric Bruneton, and Cyril Crassin. Interactive multiple anisotropic scattering in clouds. In ACM Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, i3D, pages 173–182, February 2008.
- [Bou04] Antoine Bouthors. Rendu réaliste de nuages en temps réel. Master’s thesis, Université de Marne la Vallée, Paris, Septembre 2004.
- [Bou08] Antoine Bouthors. Real-time realistic rendering of clouds. PhD thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2008.
- [Cha97] Christophe Chaudy. Modélisation et rendu d’images réalistes de paysages naturels. PhD thesis, Université de Joseph Fourier, Grenoble, 1997.
- [DKY00] Yoshinori Dobashi, Kazufumi Kaneda, Hideo Yamashita, Tsuyoshi Okita, and Tomoyuki Nishita. A simple, efficient method for realistic animation of clouds. In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000, pages 19–28, July 2000.
- [DNYO98] Yoshinori Dobashi, Tomoyuki Nishita, Hideo Yamashita, and Tsuyoshi Okita. Modeling of clouds from satellite images using metaballs. In Pacific Graphics ’98, October 1998.
- [DOY12] Yoshinori Dobashi, Wataru Iwasaki, Ayumi Ono, Tsuyoshi Yamamoto, Yonghao Yue, and Tomoyuki Nishita. An Inverse Problem Approach for Automatically Adjusting the Parameters for Rendering Clouds Using Photographs. ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH Asia 2012), volume 31 (6), November 2012.
- [DSY10] Yoshinori Dobashi, Yusuke Shinzo, and Tsuyoshi Yamamoto.. Modeling of clouds from a single photograph. Computer Graphics Forum, volume 29 (7), pages 2083–2090, September 2010.
- [Ebe97] David S. Ebert. Volumetric procedural implicit functions (A cloud is born). In SIGGRAPH 97 Technical Sketches Program, pages 245, August 1997.

- [EMP94] David Ebert, Kent Musgrave, Darwyn Peachey, Ken Perlin, and Worley. *Texturing and Modeling : A Procedural Approach*. Academic Press, October 1994.
- [EP90] David S. Ebert and Richard E. Parent. Rendering and Animation of Gaseous Phenomena by Combining Fast Volume and Scanline A-Buffer Techniques. In *Computer Graphics*, volume 24 (4), pages 357–366, August 1990.
- [ES00] Pantelis Elinas and Wolfgang Stürzlinger. Real-time rendering of 3D clouds. *Journal of Graphics Tools*, volume 5 (4), pages 33-45, 2000.
- [EWR12] Oskar Elek, Tobias Ritschel, Alexander Wilkie, and Hans-Peter Seidel. Interactive Cloud Rendering Using Temporally-Coherent Photon Mapping . In *Graphics Interface Conference*, pages 141–148, Toronto, Ontario, Canada, May 2012.
- [FSJ01] Ronald Fedkiw, Jos Stam, and Henrik Wann Jensen. Visual simulation of smoke. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pages 15–22, August 2001.
- [Gar84] Geoffrey Y. Gardner. Simulation of natural scenes using textured quadric surfaces. In Hank Christiansen, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '84 Proceedings)*, volume 18, pages 11–20, July 1984.
- [Gar85] Geoffrey Y. Gardner. Visual simulation of clouds. In B. A. Barsky, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings)*, volume 19, pages 297–303, July 1985.
- [HAP05] Kyle Hegeman, Michael Ashikhmin, and Simon Premože. A lighting model for general participating media. In *ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D graphics and games (I3D)*, pages 117–124, 2005.
- [HISL03] Mark J. Harris, William V. Baxter III, Thorsten Scheuermann, and Anselmo Lastra. Simulation of cloud dynamics on graphics hardware. In *Graphics Hardware 2003*, pages 92–101, July 2003.
- [HL01] Mark J. Harris and Anselmo Lastra. Real-time cloud rendering. *Computer Graphics Forum* volume 20 (3), pages 76-84, 2001.
- [HMS05] Jörg Haber, Marcus Magnor, and Hans-Peter Seidel. Physically-based simulation of twilight phenomena. *ACM Trans. Graph.*, volume 24(4), pages 1353–1373, 2005.
- [Kan90] Kazufumi Kaneda, Takashi Okamoto, Eihachiro Nakamae, and Tomoyuki Nishita. Highly Realistic Visual Simulation of Outdoor Scenes under Various Atmospheric Conditions. *CG International '90*, Springer-Verlag, pages 117 – 131, 1990.
- [Kaj86] James T. Kajiya. The rendering equation. In *SIGGRAPH '86 : Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 143–150, 1986.
- [KH84] James T. Kajiya and Brian P. Von Herzen. Ray tracing volume densities. In *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 84)*, volume 18, pages 165–174, July 1984.
- [Max81] Nelson L. Max. Vectorized Procedural Models for Natural Terrain: Waves and Islands in the Sunset. *Proceedings of SIGGRAPH'81*. In *Computer Graphics*. Volume 15 (3), pages 317-324 August 1981.
- [Max86] Nelson L. Max. Light diffusion through clouds and haze. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, volume 33 (3), pages 280–292, March 1986.
- [Max94a] Nelson L. Max. Computer animation of clouds. In *Proceedings of Computer*, pages 167–174, 1994.

- [Max94b] Nelson L. Max. Efficient light propagation for multiple anisotropic volume scattering. In Fifth Eurographics Workshop on Rendering, pages 87–104, June 1994.
- [Moh05] Mohd Shahrizal Sunar. The development of cloud modelling and motion Analysis for virtual environment. PhD thesis, Université de technologie Malaisie, 2005.
- [MYDN01] Ryo Miyazaki, Satoru Yoshida, Tomoyuki Nishita, and Yoshinori Dobashi. A method for modeling clouds based on atmospheric fluid dynamics. In 9th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, pages 363–372, October 2001.
- [NDKY00] Tomoyuki Nishita, Yoshinori Dobashi, Kazufumi Kaneda, and Hideo Yamashita. Display method of the sky color taking into account multiple scattering, December 2000.
- [Ney00] Fabrice Neyret. A phenomenological shader for the rendering of cumulus clouds. Technical Report RR-3947, INRIA, May 2000.
- [NND96] Tomoyuki Nishita, Eihachiro Nakamae, and Yoshinori Dobashi. Display of clouds taking into account multiple anisotropic scattering and sky light. In SIGGRAPH 96 Conference Proceedings, pages 379–386, August 1996.
- [NSTN93] Tomoyuki Nishita, Takao Sirai, Katsumi Tadamura, and Eihachiro Nakamae. Display of the earth taking into account atmospheric scattering. In SIGGRAPH 93 : Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pages 175–182, 1993.
- [PAS03] Simon Premože, Michael Ashikhmin, and Peter Shirley. Path integration for light transport in volumes. In Eurographics Symposium on Rendering (EGSR), pages 52–63, 2003.
- [PAT04] Simon Premože, Michael Ashikhmin, Jerry Tessendorf, Ravi Ramamoorthi, and Shree Nayar. Practical rendering of multiple scattering effects in participating media. In Eurographics Symposium on Rendering (EGSR) , pages 363–374, June 2004.
- [Per85a] Ken Perlin. An image synthesizer. In B. A. Barsky, editor, Computer Graphics (SIGGRAPH '85 Proceedings), volume 19 (3), pages 287–296, July 1985.
- [PSS99] Arcot J. Preetham, Peter Shirley, and Brian Smits. A practical analytic model for daylight. In Proceedings of SIGGRAPH 99, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference series pages 91–100, August 1999.
- [REK04] Kirk Riley, David S. Ebert, Martin Kraus, Jerry Tessendorf, and Charles Hansen. Efficient rendering of atmospheric phenomena. In Eurographics Symposium on Rendering (EGSR), pages 375–386, June 2004.
- [RT87] Holly E. Rushmeier and Kenneth E. Torrance. The zonal method for calculating light intensities in the presence of a participating medium. In Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 87), volume 21, pages 293–302, July 1987.
- [Slo02] Jaroslav Sloup. A survey of the modelling and rendering of the Earth's atmosphere. In SCCG '02: Proceedings of the 18th spring conference on Computer graphics, pages 141–150, 2002.
- [SSEH03] Joshua Schpok, Joseph Simons, David S. Ebert, and Charles Hansen. A real-time cloud modeling, rendering, and animation system. Symposium on Computer Animation'03, pages 160–166, July 2003.
- [Sta95] Jos Stam. Multiple Scattering as a Diffusion Process. In Eurographics Workshop on Rendering (EGWR), pages 41–50, 1995.

- [Vid08] Vincent Vidal. Illumination réaliste de terrains en temps-réel. Master's thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble, June 2008.
- [Vos85] Richard Voss. Fractal forgeries. In R. A. Earnshaw, editor, *Fundamental Algorithms for Computer Graphics*. Springer-Verlag, 1985.
- [Voss83] Richard Voss. Fourier synthesis of gaussian fractals: 1/f noises, landscapes, and flakes. Tutorial on State of the Art Image Synthesis, ACM Siggraph Course Notes, 1983.
- [Wil78] Lance Williams. Casting curved shadows on curved surfaces. In *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 78)*, volume 12, pages 270–274, August 1978.
- [Will87] Philip Willis. Visual Simulation of Atmospheric Haze. *Computer Graphics Forum*. Volume 6, pages 35–42, 1987.