



**HAL**  
open science

# Rendu multi-échelle de pluie et interaction avec l'environnement naturel en temps réel

Yoann Weber

► **To cite this version:**

Yoann Weber. Rendu multi-échelle de pluie et interaction avec l'environnement naturel en temps réel. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. Université de Limoges, 2016. Français. NNT : 2016LIMO0109 . tel-01429270v2

**HAL Id: tel-01429270**

**<https://theses.hal.science/tel-01429270v2>**

Submitted on 13 Feb 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# UNIVERSITÉ DE LIMOGES

ÉCOLE DOCTORALE n° 521

SCIENCES ET INGÉNIERIE POUR L'INFORMATION, MATHÉMATIQUES

FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2016

## Thèse

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LIMOGES**

**Discipline : Informatique Graphique**

présentée et soutenue par

**Yoann WEBER**

le 15 novembre 2016

**Rendu multi-échelle de pluie et interaction  
avec l'environnement naturel en temps réel**

Thèse dirigée par Djamchid Ghazanfarpour et Vincent Jolivet

**JURY :**

<b>Mateu SBERT</b>	Professeur, Université de Gérone	Rapporteur
<b>Jean-Pierre JESSEL</b>	Professeur, Université Paul Sabatier	Rapporteur
<b>Marie-Paule CANI</b>	Professeure, Grenoble INP	Examinateur
<b>Djamchid GHAZANFARPOUR</b>	Professeur, Université de Limoges	Examinateur
<b>Vincent JOLIVET</b>	Maître de Conférences, Université de Limoges	Examinateur
<b>Guillaume GILET</b>	Maître de Conférences, Université de Limoges	Invité



## *Remerciements*

Je remercie les rapporteurs et les membres du jury d'avoir bien voulu participer à l'évaluation de ce travail. Je remercie également mes collègues pour leur soutien, et tout spécialement Jean-Christophe pour son humour inaltérable. Je remercie enfin Kazuki Nanko, chercheur japonais spécialisé en hydrologie des forêts, pour notre fructueuse collaboration.

# Table des matières

---

<b>Table des figures</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>Liste des tableaux</b> . . . . .	<b>8</b>
<b>Résumé</b> . . . . .	<b>10</b>
<b>Introduction</b> . . . . .	<b>12</b>
<b>I Rendu multi-échelle de la pluie</b>	<b>17</b>
<b>Chapitre 1 : État de l’art des méthodes de rendu de pluie et des phénomènes atmosphériques</b> . . . . .	<b>19</b>
1.1 Rendu de la pluie . . . . .	20
1.2 Rendu des phénomènes atmosphériques . . . . .	33
1.3 Synthèse . . . . .	42
<b>Chapitre 2 : Étude sur la visibilité de la pluie : de la goutte à la dégradation optique</b> . . . . .	<b>43</b>
2.1 La pluie, deux échelles de visibilité . . . . .	44
2.2 Échelle mésoscopique : les gouttes visibles . . . . .	45
2.2.1 Perception des gouttes . . . . .	45
2.2.2 Empreinte d’une goutte . . . . .	45
2.2.3 Apparence des cordes . . . . .	47
2.2.4 Distribution des tailles de gouttes . . . . .	48
2.3 Échelle macroscopique : la dégradation optique . . . . .	50
2.3.1 La pluie, un milieu participant . . . . .	50
2.3.2 Absorption et diffusion sortante . . . . .	50
2.3.3 Diffusion entrante . . . . .	53
2.3.4 Équation du transfert de la lumière . . . . .	55
2.3.5 Extinction par temps de pluie . . . . .	55
2.4 Synthèse . . . . .	58
<b>Chapitre 3 : Modèle multi-échelle pour le rendu de la pluie en temps réel</b> . . . . .	<b>59</b>
3.1 Contexte . . . . .	60
3.2 Synthèse de l’existant . . . . .	61
3.2.1 Le rendu des cordes . . . . .	61
3.2.2 L’atténuation de la visibilité . . . . .	62
3.3 Apports . . . . .	63
3.4 Modèle multi-échelle de pluie en temps réel . . . . .	64
3.4.1 Échelle mésoscopique : rendu des cordes . . . . .	64
3.4.2 Échelle macroscopique : rendu de la dégradation optique . . . . .	69
3.5 Implémentation . . . . .	73
3.5.1 CPU . . . . .	73
3.5.2 GPU . . . . .	73
3.6 Résultats . . . . .	74

---

<b>II</b>	<b>Rendu des interactions avec l'environnement naturel</b>	<b>77</b>
	<b>Chapitre 4 : État de l'art sur la gestion des interactions entre les gouttes et l'environnement</b>	<b>79</b>
4.1	Rendu des égouttements	80
4.2	Rendu du couplage entre les gouttes et l'environnement	81
4.3	Synthèse	85
	<b>Chapitre 5 : Étude sur les égouttements provenant des arbres</b>	<b>86</b>
5.1	Modèle hydrologique	87
5.2	Distribution temporelle	88
5.3	Distribution spatiale	90
5.4	Distribution des tailles de gouttes	91
5.5	Fréquence locale d'égouttement	93
5.6	Formalisation mathématique des égouttements	94
5.7	Synthèse	97
	<b>Chapitre 6 : Modèle phénoménologique pour le rendu des égouttements en temps réel</b>	<b>98</b>
6.1	Contexte	99
6.2	Synthèse de l'existant	100
6.3	Apports	101
6.4	Représentation fonctionnelle des égouttements	102
6.5	Implémentation	104
6.6	Résultats	105
	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>109</b>
	Conclusion	110
	Perspectives	112

# Table des figures

1.1	Double cône (gauche) et exemple de texture (droite) [54]	21
1.2	Rendu de neige à Seattle par Wang et Wade [54]	22
1.3	Avec les particules uniquement (a) et avec la méthode spectrale (b) [30]	22
1.4	Combinaison du système de particules et de la méthode spectrale [30]	23
1.5	Rendu de pluie par Langer et al [30]	23
1.6	Scène Toyshop de Tatarchuk et Isodoro [51]	24
1.7	Rendu des cordes par Garg et Nayar [15]	25
1.8	Masque de réfraction [46]	26
1.9	Rendu des cordes par Rousseau et al [45]	27
1.10	Rendu des cordes par Wang et al [53]	27
1.11	Rendu de pluie par tariq [50]	28
1.12	Rendu de pluie par Wang et al [9]	29
1.13	Gestion du conteneur de particules en fonction de la position de l'observateur [40]	30
1.14	Rendu de cordes par Puig-Centelles et al [40]	30
1.15	Rendu de gouttes par Slomp et al [47]	31
1.16	Rendu de pluie par Puig-Centelles et al [41]	32
1.17	Rendu de pluie par Creus et Patow [12]	33
1.18	Évaluation de la distance parcourue par la lumière [29]	34
1.19	Rendu atmosphérique de nuit par Inakage [20]	35
1.20	Rendu atmosphérique par Kaneda et al [24]	35
1.21	Coucher de soleil par Irwin [21]	36
1.22	Diffusion multiple par Nishita et al [38]	36
1.23	Rendu atmosphérique par Jackèl et Walter [22]	38
1.24	Rendu d'une scène à différents moments de la journée et sous différentes conditions climatiques par Preetham et al [39]	39
1.25	Rendu du brouillard par Hoffman et Preetham [19]	39
1.26	Rendu du ciel et des rayons du soleil par Dobashi et al [13]	40
1.27	Rendu atmosphérique par Riley et al [42]	40
1.28	Rendu atmosphérique depuis le ciel et la terre par Bruneton et Neyret [5]	41
2.1	Étude sur la visibilité de la pluie [16]	44
2.2	2 cordes de tailles différentes peuvent avoir la même taille de projection selon leur distance à l'observateur.	47
2.3	Rousseau et al [46] expliquent que le pixel reçoit la contribution de chaque instance d'une même goutte à différents instants	48
2.4	Bibliothèque de textures de Garg et Nayar [15]	49
2.5	Les 4 types d'interaction dans un milieu participant [23]	51
2.6	Section efficace d'absorption [19]	51
2.7	Section efficace de diffusion sortante [19]	52
2.8	Comportement de la lumière au contact des particules en fonction de leur taille [16]	53
2.9	Distribution de la fonction de phase de Rayleigh $\mathcal{P}_R$ [19]	54
2.10	Distribution de la fonction de phase de Mie $\mathcal{P}_M$ en fonction de l'excentricité $g$ [19]	55
3.1	(a) Motif de corde original. Reconstruction d'un motif en utilisant (b) 6 fréquences et (c) 3 fréquences.	66

---

3.2	Simulation d'une partie du cône de vision pour une taille de projection ou empreinte $E$ et pour un diamètre de gouttes $D$ , en fonction des paramètres de la caméra $f_{ov}$ et $T$ . . . . .	68
3.3	Rendu d'une pluie faible . . . . .	74
3.4	Rendu d'une pluie forte . . . . .	74
3.5	Génération procédurale des cordes en faisant varier l'intensité de la pluie. . . . .	75
4.1	Rendu des égouttements de Tatarchuk et Isodoro [51] . . . . .	81
4.2	Rendu des interactions entre les gouttes et les arbres par Yang et al [59] . . . . .	82
4.3	Rendu des gouttes en contact avec une feuille et un lapin par Wang et al [52] . . . . .	82
4.4	Interactions entre les gouttes et les surfaces vitrées par Kaneda et al [25] . . . . .	83
4.5	Interactions entre les gouttes et différentes surfaces par Zhang et al [61] . . . . .	84
5.1	Vue schématique de la distribution temporelle des égouttements . . . . .	88
5.2	Ajustement des distributions des tailles de gouttes selon une forme gaussienne pour chaque espèce d'arbre . . . . .	92
5.3	La fonction de distribution $f_m$ est la composition de la fonction périodique $f$ et de la fonction de mappage $m$ . L'espace d'évaluation de la fonction est distordu pour tenir compte de la vélocité instantanée des gouttes et de la résistance de l'air. . . . .	96
6.1	Deux modes d'oscillations d'une goutte au cours du temps selon Garg et Nayar [16] . . . . .	104
6.2	Scène naturelle d'origine . . . . .	106
6.3	Scène naturelle avec la pluie uniquement . . . . .	106
6.4	Scène naturelle avec la pluie et les égouttements . . . . .	107
6.5	Scène naturelle avec les égouttements uniquement . . . . .	107
6.6	Égouttements vus de l'intérieur de l'arbre . . . . .	108
6.7	Égouttements vus de l'intérieur et de l'extérieur de l'arbre selon deux intensités de pluie . . . . .	108
6.8	Rendu d'une pluie forte . . . . .	110
6.9	Scène naturelle avec la pluie et les égouttements . . . . .	111



# Liste des tableaux

1.1	Classification des papiers sur le rendu de la pluie . . . . .	20
1.2	Classification des papiers sur le rendu des phénomènes atmosphériques . .	34
2.1	Valeur du coefficient $K(n)$ . . . . .	57
2.2	Calcul du coefficient d’extinction selon l’intensité des précipitations . . . .	57
5.1	Ratios de distribution spatiale en fonction de l’épaisseur de la canopée et de la distance radiale entre le tronc et la goutte . . . . .	91
5.2	Ratios moyens de la distribution des tailles de gouttes en fonction de l’espèce de l’arbre . . . . .	91
5.3	Coefficients $a$ , $b$ et $c$ de l’équation 5.4 en fonction de l’espèce . . . . .	92

# Résumé

La représentation des phénomènes météorologiques est un enjeu essentiel en Informatique Graphique dans l'optique d'obtenir des scènes extérieures visuellement réalistes. Depuis quelques années, les chercheurs se sont penchés sur la simulation de la pluie en synthèse d'images. Jusqu'à présent, les recherches se sont surtout orientées sur le rendu des cordes. Or, une scène de pluie regroupe un grand nombre d'effets tels que la dégradation de la visibilité, les égouttements provenant de l'environnement, les éclaboussures et les écoulements sur le sol, ou encore le changement d'aspect des matériaux mouillés.

Ce mémoire a pour but de présenter deux méthodes de rendu : une première méthode pour le rendu de la pluie, et une seconde pour le rendu des égouttements provenant des arbres. Notre modèle de rendu de pluie est une méthode multi-échelle permettant de tenir compte des propriétés locales et globales de ce phénomène. Nous avons réussi à mettre en corrélation la densité des gouttes proches de l'observateur (échelle mésoscopique) avec l'atténuation de la visibilité (échelle macroscopique), en fonction d'un seul paramètre global cohérent : l'intensité des précipitations. Cette méthode a fait l'objet d'une publication [56] dans la revue *Computers & Graphics* en 2015.

D'autre part, nous basons notre méthode pour le rendu des égouttements sur une approche phénoménologique. Une telle approche s'avère plus adaptée pour gérer les grands espaces, et présente l'avantage d'être indépendante de la complexité de la scène. L'approche choisie s'appuie sur des expérimentations et des mesures hydrologiques effectuées par des chercheurs spécialisés dans l'hydrologie des forêts. Cela nous permet de déterminer la distribution des égouttements dans le temps et dans l'espace pour chaque taille de gouttes et pour chaque espèce d'arbres. Nous proposons ainsi un modèle d'égouttement cohérent tenant compte des propriétés intrinsèques à chaque type d'arbre. Cette méthode a fait elle aussi l'objet d'une présentation à la conférence Eurographics Symposium on Rendering (EGSR) ainsi que d'une publication [57] au journal *Computer Graphics Forum (CGF)* en 2016.

# Introduction

## La pluie et ses interactions en synthèse d'images

La modélisation des phénomènes météorologiques est très importante en informatique graphique si l'on souhaite obtenir des scènes extérieures visuellement convaincantes. Cela ne fait que quelques années que les chercheurs se sont penchés sur la simulation de la pluie en synthèse d'images. Une scène de pluie regroupe un grand nombre d'effets visuels comme l'apparition de cordes du fait de la persistance visuelle humaine, la dégradation de la visibilité ou encore les nombreuses interactions avec l'environnement. Concernant les interactions, nous pouvons citer entre autres les égouttements provenant des arbres et des toits, les écoulements sur le sol, les éclaboussures ou encore le changement d'aspect des matériaux mouillés. Modéliser tous ces phénomènes nécessite de résoudre des problèmes complexes très différents les uns des autres, notamment si l'on souhaite obtenir une simulation temps réel la plus physiquement réaliste possible. L'accroissement permanent de la place des applications graphiques temps réel dans l'industrie nécessite de parvenir à un rendu toujours plus réaliste, que ce soit concernant les jeux vidéos ou les simulations temps réel au sens large.

Concernant le rendu de la pluie, la plupart des chercheurs orientent leurs travaux sur le rendu des gouttes de façon à simuler leur apparence et la gêne qu'elles occasionnent sur la visibilité au premier plan. D'autres en revanche se focalisent sur le rendu des cordes et tentent de reproduire certains phénomènes lumineux présents par temps de pluie. Néanmoins, nous allons voir qu'aucune méthode ne propose une solution satisfaisante et physiquement plausible pour simuler la dégradation optique par temps de pluie. En effet, l'ensemble des gouttes présentes dans l'air dans la scène entraîne la création de ce que nous appelons un milieu participant, à savoir un milieu dans lequel un grand nombre d'interactions lumineuses ont lieu. Toutes les gouttes présentes dans l'environnement ont pour effet de perturber la trajectoire initiale de la lumière et cela se traduit dans les faits par une atténuation de la visibilité en arrière plan plus ou moins significative, selon l'intensité des précipitations. Il s'agit en réalité d'un point très important négligé jusqu'alors dans la littérature scientifique. Simuler uniquement les gouttes visibles au premier plan ne permet pas de ressentir la densité du phénomène à grande échelle. Il est par conséquent nécessaire de proposer un rendu de cette dégradation optique en arrière plan en complément du rendu des gouttes visibles au premier plan.

La littérature scientifique met également en évidence un manque sérieux concernant certains types d'interactions entre la pluie et l'environnement, et plus particulièrement les égouttements provenant de l'environnement naturel tel qu'une forêt. Après avoir été interceptée par le feuillage, l'eau de pluie va d'abord être stockée au sein de l'arbre pour être ensuite ré-émise sous la forme d'égouttements. Dans la suite du mémoire, nous ferons aussi référence à ce phénomène sous le nom de *régénération*. Ce phénomène

d'égouttement est en pratique très difficile à simuler puisqu'il dépend de la structure et de toutes les propriétés intrinsèques de l'arbre (espèce, indice de surface foliaire, etc.). Certaines méthodes ont déjà tenté d'apporter des solutions concernant le couplage des gouttes avec les feuilles par temps de pluie au travers de méthodes dites physiquement réalistes. Néanmoins, aucune méthode ne propose jusqu'à présent une solution efficace, réaliste et compatible temps réel pour la gestion des égouttements provenant du feuillage des arbres. Un grand nombre de gouttes doivent être modélisées pour parvenir à un haut niveau de réalisme, ce qui implique de proposer une méthode peu coûteuse tout en étant physiquement plausible.

Étant donné les manques constatées dans la littérature scientifique, nous avons choisi de nous concentrer dans ce mémoire sur les deux sujets abordés ci-dessus : le *rendu de la pluie* en tenant compte de la *dégradation de la visibilité*, et le *rendu des égouttements* provenant du feuillage des arbres. Il s'agit de deux problèmes complexes pour lesquels nous allons apporter une solution temps réel et physiquement plausible.

## Difficultés concernant le rendu de la pluie et des égouttements

Nous cherchons tout d'abord dans ce mémoire à représenter les deux principaux aspects de la pluie : les gouttes visibles individuellement au premier plan, et les gouttes non visibles (car trop éloignées de l'observateur) mais perçues sous la forme d'une atténuation de la visibilité en arrière plan. Nous pouvons considérer ces deux aspects comme étant deux échelles de visibilité de la pluie : l'échelle *mésoscopique* pour les gouttes proches et l'échelle *macroscopique* pour celles qui sont éloignées. Les gouttes étant petites et très nombreuses par temps de pluie, il n'est pas envisageable de gérer l'ensemble des gouttes présentes dans la scène selon une approche identique. De plus, augmenter le nombre de gouttes visibles ne permet pas de ressentir la densité du phénomène car cela n'entraîne pas une dégradation de la visibilité. Il serait plus approprié d'avoir une première approche permettant de faire uniquement le rendu des gouttes proches et visibles à l'œil nu, et une seconde permettant de représenter plus globalement l'ensemble des gouttes dans la scène avec un effet d'atténuation de la visibilité. Cela éviterait ainsi de faire des calculs inutiles pour des gouttes trop petites à l'écran (de la taille du pixel ou du sous-pixel). Le problème ici est donc de formuler une méthode adaptée pour le rendu de pluie tenant compte de ces propriétés physiques, et proposant une corrélation entre ces deux échelles de visibilité. L'utilisateur doit également être capable de modifier la simulation en augmentant ou en diminuant le nombre de gouttes dans la scène de façon interactive. L'utilisateur doit donc avoir à sa disposition un ensemble de paramètres lui permettant de garder le contrôle de la simulation afin d'obtenir le résultat souhaité.

La gestion des égouttements provenant des arbres revêt elle aussi plusieurs problèmes, notamment du fait de la complexité de l'environnement naturel. Il serait très difficile de proposer une approche physiquement réaliste tenant compte de la structure de chaque arbre présent dans l'environnement tout en assurant une fréquence d'images suffisante pour du temps réel. La structure d'un arbre étant très complexe, cela reviendrait à gérer l'ensemble des interactions opérant au sein de l'arbre, ce dernier pouvant contenir des milliers voire des millions de feuilles ou d'aiguilles selon l'espèce. De plus, le phénomène d'égouttement, bien qu'étant très important pour accroître le sentiment de réalisme dans une scène de pluie, n'est pas nécessairement visible en permanence contrairement à la pluie en elle-même. Cela dépend clairement de la nature du terrain et de la quantité d'arbres présents autour de la caméra à un instant donné. Il est donc préférable de proposer une méthode présentant un bon rapport entre la complexité algorithmique et l'impact visuel du phénomène ; le problème étant d'être capable de gérer des environnements naturels vastes et complexes tout en représentant un grand nombre de gouttes dans la scène.

## Objectifs et apports du mémoire

Nous nous fixons les objectifs suivants pour répondre à la problématique :

- le rendu de la pluie selon une approche multi-échelle afin de représenter les propriétés locales et globales de ce phénomène. Nous proposons de corrélérer l’atténuation de la visibilité (vue macroscopique) inhérente à la pluie et la densité des gouttes visibles au premier plan (vue mésoscopique) en fonction d’un seul paramètre d’entrée, l’intensité des précipitations. L’utilisateur garde ainsi le contrôle sur la simulation au travers d’un seul paramètre global cohérent. Ce paramètre permettra d’évaluer la densité des gouttes dans la scène et de corrélérer les deux échelles de visibilité selon une distribution identique des tailles de gouttes [34]. La représentation des cordes est assurée par une génération procédurale basée sur la théorie du *sparse convolution*. Une fonction de densité vient quant à elle quantifier le nombre de cordes visibles au premier plan, et cela en fonction de l’intensité de la pluie et des paramètres de la caméra. Le rendu de la dégradation optique est basé sur une diffusion simple (un seul rebond dans la scène) de la lumière de façon à limiter les temps de calcul tout en garantissant un rendu réaliste.
- le rendu des égouttements provenant de l’environnement naturel selon une approche phénoménologique de façon à proposer une méthode temps réel adaptée aux grands espaces et indépendante de la complexité de la scène. L’approche choisie se base sur des expérimentations et des mesures hydrologiques effectuées par des chercheurs spécialisés dans l’hydrologie des forêts. Nous expliquerons comment nous utilisons ces mesures afin de proposer un modèle d’égouttement cohérent tenant compte des propriétés intrinsèques des différents types d’arbres. Le modèle hydrologique est entièrement paramétrable et contrôlable par l’utilisateur. Il tient compte de la distribution spatiale et temporelle des égouttements, ainsi que de la distribution des tailles de gouttes. En s’appuyant sur des mesures réelles et sur les caractéristiques intrinsèques des arbres, notre modèle permet d’avoir une distribution réaliste des égouttements. Nous pré-calculons un ensemble de points de régénération à partir desquels les égouttements vont se produire. Le rendu des égouttements se fait ensuite de façon entièrement fonctionnelle. Notre modèle garantit ainsi un contrôle sur la fréquence des égouttements en tout point de l’arbre. Nous introduisons également une structure accélératrice afin d’évaluer uniquement les pixels de la scène influencés par les égouttements.

Le mémoire se décompose ainsi en deux parties : une première partie sur le rendu multi-échelle de la pluie, et une seconde partie sur le rendu des égouttements provenant de l’environnement naturel.

## Première partie

### Rendu multi-échelle de la pluie

Nous présentons dans cette première partie du mémoire notre méthode de rendu de pluie, selon une approche multi-échelle en temps réel. Cette première partie se décompose comme suit :

- le chapitre 1 présente un état de l'art des différentes méthodes de rendu de pluie ainsi que des méthodes de rendu des phénomènes atmosphériques. Ces méthodes vont nous permettre de mettre en évidence les manques existants de la littérature scientifique afin de proposer un modèle cohérent et multi-échelle tenant compte des propriétés physiques de la pluie.
- Le chapitre 2 présente une étude physique sur les deux échelles de visibilité de la pluie. Nous analysons comment les gouttes proches sont perçues par l'observateur et comment la pluie entraîne une dégradation de la visibilité. Ce chapitre expose les fondements mathématiques sur lesquels nous allons nous appuyer pour le rendu de la pluie.
- Nous introduisons dans le chapitre 3 une nouvelle méthode de rendu de pluie temps réel et multi-échelle de façon à corrélérer l'intensité des précipitations visibles au premier plan et la dégradation de la visibilité. Cette méthode s'appuie à la fois sur l'état de l'art du chapitre 1 et sur l'étude physique du chapitre 2. Ce modèle de pluie [56] a fait l'objet d'une publication dans le journal *Computers & Graphics* en 2015.

Chapitre 1 :

État de l'art des méthodes de rendu de  
pluie et des phénomènes  
atmosphériques

Ce chapitre a pour but de présenter aussi bien les méthodes de rendu de pluie que les méthodes offrant un rendu des phénomènes atmosphériques. Nous présentons ces deux catégories de méthodes afin d’avoir un aperçu complet des modèles existants pour représenter à la fois les gouttes proches, visibles à l’œil nu par l’observateur, et la dégradation optique provoquée par la présence de toutes les gouttes dans la scène.

## 1.1 Rendu de la pluie

La première partie de cet état de l’art porte sur les méthodes de rendu de pluie en temps réel. Cette partie a pour objectif de mettre en évidence les manques des méthodes actuelles. Nous allons ainsi voir tout au long de cette étude qu’aucune méthode ne propose jusqu’à présent une solution satisfaisante pour représenter et corrélérer l’intensité des précipitations visibles au premier plan et l’atténuation de la visibilité constatée en arrière plan. Dans cet état de l’art, nous avons choisi de classer les papiers (Tableau 1.1) selon qu’ils prennent en compte ou non l’atténuation de la visibilité, que cette dernière est corrélée ou non avec l’intensité des précipitations et comment les auteurs gèrent la dégradation optique.

Papier	Atténuation	Corrélation	Type
Wang et Wade [54]	oui	non	flou
Langer et al [30]	oui	non	flou spectral
Tatarchuk et Isodoro [51]	oui	non	brouillard classique
Garg et Nayar [15]		non	
Rousseau et al [46] [45]		non	
Wang et al [53]	oui	non	brouillard classique
tariq [50]	oui	non	brouillard avec prise en compte des lumières
Wang et al [9]	oui	oui	rendu atmosphérique
Puig-Centelles et al [40] [41]		non	
Slomp et al [47]		non	
Creus et Patow [12]	oui	non	brouillard classique

Tableau 1.1 – Classification des papiers sur le rendu de la pluie

Wang et Wade [54] adoptent une technique de façon à éviter l’utilisation d’un système de particules. Les auteurs expliquent qu’une pluie très dense peut être compliquée à modéliser à l’aide uniquement de particules, et être coûteuse en temps de calcul. Leur technique repose donc sur l’utilisation d’un double cône (Figure 1.1) sur lequel 4 textures sont appliquées ; la caméra est positionnée au centre. La méthode se décompose en trois étapes. La première étape consiste à incliner le cône de façon à coller au mouvement de la caméra. Ensuite un flou est appliqué sur les textures afin de densifier l’effet météorologique. Une dernière étape consiste à faire défiler les textures vers le bas pour simuler la force de

gravité. Cette méthode permet d'obtenir des résultats visuellement convaincants (Figure 1.2). Un système de particules pourrait ne faire apparaître qu'un ensemble de gouttes ou de flocons disposés de façon pseudo-aléatoire, sans pour autant créer une impression de densité. Cette méthode a été mise au point pour le simulateur de vol Flight Simulator 2004 dans lequel on a une vision très éloignée de la scène. Bien qu'étant datée aujourd'hui, cette méthode s'avère être efficace dans le cas où il n'est pas nécessaire d'avoir une gestion physique des gouttes ou des flocons dans la scène. Cela nécessite néanmoins de créer des textures suffisamment convaincantes selon les conditions météorologiques que l'on souhaite simuler. Dans ce papier, les auteurs considèrent que les textures sont générées par un artiste. L'inconvénient majeur réside dans le fait qu'il est nécessaire de disposer d'un ensemble de textures si l'on souhaite simuler le phénomène selon différentes intensités. De plus, le passage d'une texture à une autre pendant la simulation peut entraîner des artefacts visuels perturbant ainsi la sensation de réalisme.

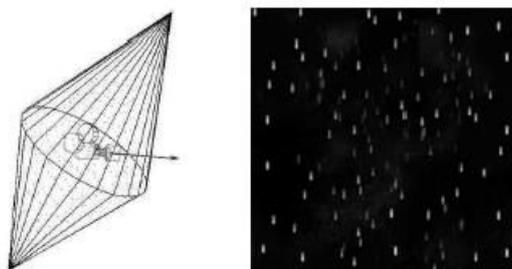


FIGURE 1.1 – Double cône (gauche) et exemple de texture (droite) [54]

Langer et al [30] proposent une méthode hybride reposant à la fois sur l'utilisation d'un système de particules et sur une méthode spectrale. Ce papier est principalement orienté sur le rendu de la neige, bien que cette approche fournisse également des résultats convaincants en ce qui concerne la pluie. Les auteurs expliquent que cette méthode permet à la fois de simuler la densité du phénomène météorologique (vue macroscopique), tout en ayant la possibilité d'observer chaque flocon individuellement (vue mésoscopique). Contrairement aux méthodes basées uniquement sur un système de particules, il n'est pas nécessaire d'augmenter significativement le nombre de flocons ou de cordes pour accroître l'effet météorologique ; le "flou spectral" contribue à lui seul à donner cette impression de densité. Les figures 1.3 et 1.4 montrent respectivement les résultats que l'on obtient avec les particules et la méthode spectrale uniquement, et avec la combinaison des deux.

La figure 1.5 montre le résultat obtenu dans le cas d'une simulation de pluie. Langer et al ont pris en compte la persistance rétinienne afin de modéliser la pluie non pas sous la forme de gouttes, mais en ayant l'apparence de cordes.

Tatarchuk et Isodoro (ATI) [51] ont mis au point une vidéo montrant une scène vaste et complexe rendue sous la pluie en temps réel. Beaucoup d'effets sont présents dans cette



FIGURE 1.2 – Rendu de neige à Seattle par Wang et Wade [54]



(a)



(b)

FIGURE 1.3 – Avec les particules uniquement (a) et avec la méthode spectrale (b) [30]



FIGURE 1.4 – Combinaison du système de particules et de la méthode spectrale [30]

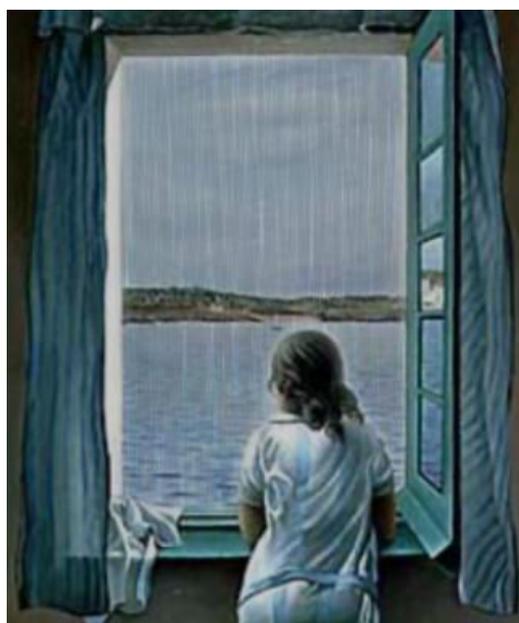


FIGURE 1.5 – Rendu de pluie par Langer et al [30]

vidéo tels que l'écoulement de l'eau sur le sol depuis une canalisation, les reflets spéculaires des lumières de la ville, ou encore les éclaboussures (Figure 1.6). Néanmoins, il ne s'agit pas d'une simulation physique. Le rendu de la scène est tout d'abord calculé et une texture de pluie est ensuite ajoutée par dessus, composée avec la scène. De ce fait, les éclaboussures ainsi que les écoulements sur le sol ne sont pas en corrélation avec les cordes affichées à l'écran. Il est intéressant de noter que leur modèle simule plusieurs couches de pluie, bougeant à des vitesses différentes selon la distance par rapport à l'observateur. Cela permet de densifier le phénomène et de retrouver l'effet parallaxe. Un brouillard a été rajouté en arrière plan afin de diminuer la visibilité des objets éloignés. Cette atténuation de la visibilité est calculée de façon purement linéaire, et ne se base pas sur une approche physique. L'effet *airlight*, halo apparaissant autour d'une source de lumière, est réalisé à l'aide d'un flou. Le rendu des éclaboussures a été réalisé à partir d'une séquence d'images montrant l'éclaboussure générée par une goutte de lait. Cette démo utilise au total 300 shaders pour simuler l'ensemble de ces phénomènes. L'accent est mis sur la diversité des effets observables, de façon à retrouver une ambiance pluvieuse convaincante.



FIGURE 1.6 – Scène Toyshop de Tatarchuk et Isodoro [51]

Garg et Nayar [15] proposent une méthode permettant d'obtenir un rendu photoréaliste des cordes. Le principe repose sur l'utilisation d'une bibliothèque de textures précalculées selon différentes intensités lumineuses, et selon différents angles d'observation. Leur travail a tout d'abord consisté à déterminer l'oscillation subie par une goutte lors de sa chute. Cette oscillation peut être mathématiquement modélisée à l'aide d'harmoniques sphériques. Certains paramètres n'étant pas connus, Garg et Nayar ont choisi de créer un grand nombre de textures en faisant varier les paramètres d'oscillation des gouttes, et

en comparant leurs résultats avec des images réelles. Ils ont pu ainsi déterminer de façon empirique les paramètres les plus adaptés. La bibliothèque de textures propose des cordes de différentes résolutions, 32, 16, 8 et 4 pixels afin d'éviter les artefacts visuels causés par le sous-échantillonnage. Bien que cette technique ait été tout d'abord introduite pour du *offline*, elle a été utilisée l'année suivante par Nvidia pour une simulation en temps réel. L'utilisation de cette méthode nécessite de connaître les propriétés ainsi que la position des sources de lumière par rapport à la caméra. Garg et Nayar expliquent qu'il peut être très difficile de réussir des scènes de pluie lors de la réalisation d'un film, et que cette méthode permet donc de rajouter une ambiance pluvieuse réaliste sur une image ou sur une vidéo. L'inconvénient majeur réside dans l'occupation mémoire de la base de données (400 Mo au total).



FIGURE 1.7 – Rendu des cordes par Garg et Nayar [15]

Rousseau et al [46] proposent une méthode physiquement réaliste pour le rendu des gouttes et des cordes. Leur travail s'inspire en grande partie des travaux de Garg et Nayar. Ces derniers ont réalisé une étude physique qui a permis entre autres de définir précisément la forme des gouttes ainsi que leur apparence. Ils ont effectivement montré qu'une goutte d'eau dispose d'un champ de vision d'environ 165 degrés, et que la réfraction est prédominante dans la plupart des cas. De plus, leur étude montre que la pluie est perçue par notre œil comme ayant l'apparence de cordes, du fait de la persistance rétinienne. De ce fait, Rousseau et al ont mis en place un modèle consistant à représenter chaque goutte par un *quad*, en permanence parallèle à l'écran, et ont utilisé un masque de réfraction de façon à ce que la goutte affiche la scène derrière elle. Leur modèle offre deux types de simulation : une simulation faisant apparaître les gouttes, et une seconde simulation physiquement réaliste faisant apparaître des cordes. La seconde simulation utilise des harmoniques sphériques pour modéliser la déformation des gouttes. Leur apparence finale est déterminée par leur position à différents instants  $t$ . La position et la vitesse des gouttes sont gérées en utilisant des textures chargées préalablement dans la mémoire tampon de la carte graphique. Un système de particules est généralement très coûteux en ressource.

De ce fait, plutôt que de créer des particules dans toute la scène, Rousseau et al ont fait le choix de les générer dans une boîte englobante, baptisée "boîte à gouttes". La caméra reste plaquée sur l'un des côtés du cube, de façon à observer en permanence toutes les particules qui évoluent à l'intérieur. Cela permet de créer un nombre limité de particules, et donc de réduire significativement les temps de calcul. Rousseau et al [45] rajoutent ensuite une gestion du vent, afin d'obtenir une animation plus réaliste. Comme pour la position et la vitesse, les directions du vent sont enregistrées dans une texture 2D. Une gestion des collisions est également intégrée à leur modèle. La simulation montre les particules en train de rebondir lorsqu'elles entrent en contact avec les objets de la scène. L'objectif n'est pas en soi de les voir rebondir, mais plutôt de montrer que l'on peut facilement détecter les collisions exactes entre les particules et les objets. Ils utilisent pour ce faire une carte de hauteur de façon à détecter quand une particule se trouve à l'intérieur d'un objet. Si c'est le cas, la position de la particule est mise à jour. Les collisions entre les particules sont néanmoins négligées car non perceptibles à l'œil nu. Cela peut permettre par la suite d'avoir une véritable corrélation entre les cordes observées et les éclaboussures sur le sol.

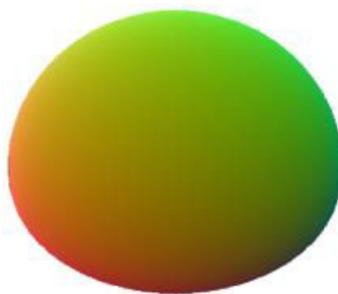


FIGURE 1.8 – Masque de réfraction [46]

Wang et al [53] utilisent l'analyse vidéo de façon à extraire des échantillons de cordes. Ces textures peuvent ensuite soit être utilisées pour obtenir un rendu temps réel dans une scène en images de synthèse, soit être ajoutées sur une autre vidéo. Cette méthode utilise un système de particules sur lesquelles les textures sont appliquées. Le rendu des particules se fait en prenant également en compte une carte d'environnement. Certains effets tels que le brouillard ont également été ajoutés de façon à retrouver une ambiance pluvieuse plus réaliste. Il est mathématiquement modélisé au travers de la loi de Beer-Lambert. L'intensité lumineuse subit une diminution exponentielle en fonction d'un coefficient de densité du milieu, et de la distance objet/observateur. Wang et al utilisent une valeur pour ce coefficient comprise entre 1.35 et 1.8. Cette valeur a dû être déterminée de façon empirique ; ils n'expliquent pas comment ils l'ont obtenue.

Tout comme l'ont fait Tatarchuk et Isodoro (ATI) en 2006, tariq (Nvidia) [50] propose à son tour une vidéo dans laquelle on peut observer une scène pluvieuse de nuit. La génération des cordes se fait en revanche cette fois-ci avec un système de particules. Chaque

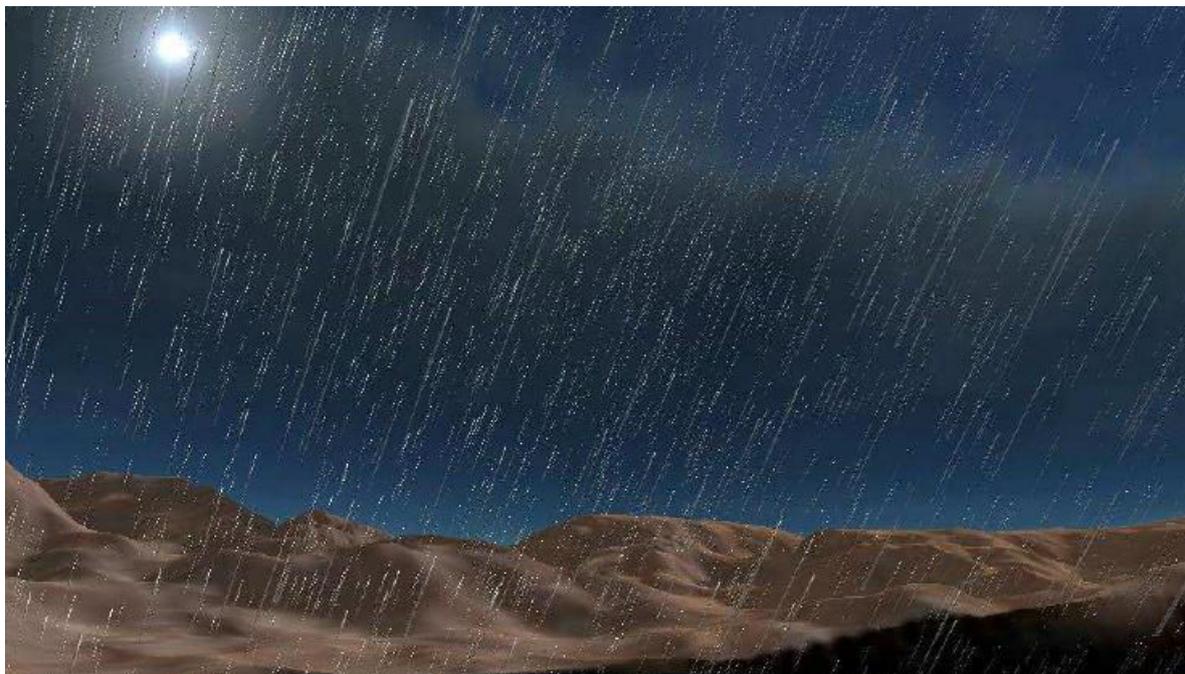


FIGURE 1.9 – Rendu des cordes par Rousseau et al [45]



FIGURE 1.10 – Rendu des cordes par Wang et al [53]

particule est représentée par un *quad*. Cette simulation utilise un sous-ensemble de la bibliothèque de textures de Garg et Nayar, de façon à limiter l'occupation mémoire. Selon les paramètres d'observation, les propriétés et la position des sources de lumière, 4 textures vont être récupérées de la base de données, et vont être interpolées pour connaître la couleur finale de chaque pixel de corde. On constate également la présence d'un brouillard afin de limiter le niveau de détail à partir d'une certaine distance. tariq a utilisé la méthode de Bo-Sun permettant de simuler l'effet *airlight* et le changement d'aspect des objets dans un milieu participant. Un effet est aussi rajouté sur le sol afin de réfléchir davantage de lumière, effet perçu en particulier la nuit. Dans sa simulation, tariq change l'intensité des sources lumineuses afin de pouvoir observer l'effet *airlight* ainsi que l'impact visuel sur les cordes.



FIGURE 1.11 – Rendu de pluie par tariq [50]

Wang et al [9] calculent le rendu des cordes en se basant sur l'oscillation des gouttes en chute libre. Ils ajoutent à cela un effet de brouillard en se basant sur une distribution statistique des particules en suspension dans la scène. Contrairement aux autres méthodes, leur modèle simule l'atténuation de la visibilité en fonction du type de particules en suspension. Les gouttes d'eau, les molécules d'air et les aérosols génèrent un milieu participant qui altère la diffusion de la lumière, et perturbent ainsi la visibilité. La distribution de Marshall et Palmer leur permet de connaître la taille et la forme des particules, et ainsi de calculer comment ces mêmes particules vont participer au rendu final de la scène. En plus de prendre en compte la lumière naturelle, leur modèle intègre également les lumières ponctuelles de la scène, et permet de faire un rendu des arcs-en-

ciel. Néanmoins, Wang et al ne précisent pas comment déterminer les fonctions de phase ainsi que le coefficient d’extinction. Nous reviendrons sur ces notions notamment dans le chapitre suivant. Une détermination purement empirique de ce coefficient ne permet pas de retrouver une apparence pluvieuse en corrélation avec l’intensité de la pluie. Wang et al n’expliquent pas non plus comment leur modèle pourrait éventuellement être utilisé pour calculer le rendu du ciel.



FIGURE 1.12 – Rendu de pluie par Wang et al [9]

Puig-Centelles et al [40] simulent le fait que la pluie se manifeste dans certaines zones, et pas dans d’autres. En effet, dans la ville réelle, observer la pluie revient à percevoir des gouttes tombant dans une certaine zone, alors que d’autres zones plus proches ou plus éloignées peuvent ne pas en contenir. Le point important est de pouvoir observer la pluie depuis une zone où il ne pleut pas. Une ellipse permet de définir la zone dans laquelle la pluie peut potentiellement tomber. Les bords de cette ellipse permettent d’obtenir une transition graduelle entre l’intérieur et l’extérieur où les cordes ne sont pas générées. De façon à limiter le nombre de particules, un conteneur ou volume englobant est créé autour de la caméra. Ce conteneur prend la forme d’un demi-cylindre afin de mieux s’adapter au champ de vision. Tant que la caméra est à l’intérieur de l’ellipse, le conteneur suit les mouvements de l’utilisateur. Si la caméra sort de l’ellipse, dans ce cas-là le conteneur reste à l’intérieur. La figure ci-dessous montre comment l’ellipse et le demi-cylindre sont utilisés pour la génération des particules. Quand l’observateur est à l’extérieur de l’ellipse, un test est effectué afin de savoir si la caméra peut voir l’ellipse, et donc les particules. Si c’est le cas, la taille du conteneur est modifiée afin de s’adapter au champ de vision de la caméra. Leur méthode prend également en compte le niveau de détail afin de modifier la taille et le nombre de particules en fonction de la distance par rapport à l’observateur. Le rendu des cordes ne gère pas la réfraction. Les cordes ont simplement un certain niveau de transparence afin de prendre en compte la scène affichée derrière.

Slomp et al [47] continuent le travail entrepris sur les gouttes par Rousseau et al. Les nouveaux processeurs graphiques pouvant désormais calculer un éclairage HDR (High Dynamic Range), il est maintenant nécessaire de prendre en compte la réflexion pour le rendu des gouttes d’eau. En effet, selon Garg et Nayar, la réflexion est prépondérante dans l’apparence des gouttes lorsque l’environnement comprend des sources de lumière

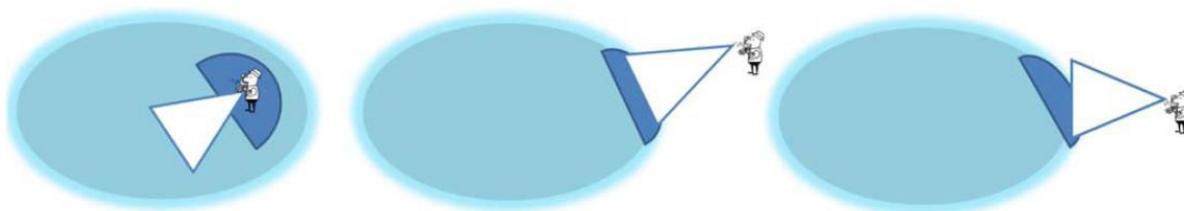


FIGURE 1.13 – Gestion du conteneur de particules en fonction de la position de l'observateur [40]



FIGURE 1.14 – Rendu de cordes par Puig-Centelles et al [40]

vive. Un éclairage HDR augmente les contrastes et rend les lumières plus éclatantes. La prise en compte de la réflexion s'avère donc être importante dans ce cas précis. La figure 1.15 montre le résultat obtenu avec plusieurs centaines de milliers de gouttes d'eau.



FIGURE 1.15 – Rendu de gouttes par Slomp et al [47]

Puig-Centelles et al [41] cherchent à améliorer les précédentes méthodes de rendu de pluie avec l'utilisation du CUDA. Le CUDA (Compute Unified Device Architecture) est une architecture de traitements parallèles, développée par Nvidia. Puig-Centelles et al utilisent cette architecture afin d'optimiser leur implémentation et d'accélérer significativement les temps de calcul. Son utilisation leur permet de gérer un système de 2 millions de particules en temps réel. Aucune texture n'est utilisée pour le rendu des cordes. Une couleur par défaut est assignée à chacune d'entre elles avec un certain niveau de transparence, de façon à ce que la scène participe au rendu final. Leur modèle propose également une gestion simplifiée et non physique des éclaboussures de façon à augmenter le réalisme de la simulation. Quand une collision est détectée, un *quad* est positionné face à l'écran à l'endroit de la collision, et une texture d'éclaboussure lui est appliquée. Puig-Centelles et al ajoutent enfin la gestion du vent pour que les cordes ne se déplacent pas purement verticalement.

Creus et Patow [12] proposent de pré-calculer un atlas de textures à partir de la bibliothèque de Garg et Nayar, ainsi qu'une texture artiste pour définir la position des particules dans un volume englobant. Les données pré-calculées permettent ensuite d'obtenir le rendu des cordes dans la scène en temps réel. Il est à noter que leur approche utilise l'intégralité de la base de données de Garg et Nayar. La gestion des collisions leur permet de détecter quand une particule entre en contact avec un objet de la scène. Une animation sur 21 images est alors jouée de façon à simuler l'éclaboussure des gouttes de pluie. Cette animation est déjà utilisée par Tatarchuk dans la vidéo de 2006. Les collisions sont calculées à partir d'une carte de hauteur, capturée depuis le haut de la scène, comme



FIGURE 1.16 – Rendu de pluie par Puig-Centelles et al [41]

dans la méthode de Rousseau et al. La figure ci-dessous reprend toutes les étapes de l'algorithme pour le rendu des cordes. Les autres effets visibles dans la scène tels que le brouillard ou les halos autour des sources de lumière sont quant à eux calculés en temps réel. Le brouillard proposé ne se base pas sur un modèle physiquement réaliste. Son opacité augmente simplement en fonction de la distance par rapport à l'observateur. De plus, une gestion plus réaliste des éclaboussures impliquerait de prendre en compte le type de matériau pour avoir une animation plus cohérente. Creus et Patow évaluent le nombre d'images par seconde en fonction du nombre de lumières présentes dans la scène. A partir de 2 lumières, la fréquence d'images passe en dessous de 20 images par seconde ; nous savons qu'un minimum de 25 images par seconde est requis pour qu'une animation paraisse visuellement cohérente.

Cette première partie de l'état de l'art nous permet d'observer les manques dans la littérature scientifique concernant le rendu de la pluie. Les solutions apportées par les précédentes méthodes concernant les deux échelles de visibilité de la pluie ne sont pas complètement satisfaisantes. En effet, lorsque certaines méthodes occultent le rendu de la dégradation optique, d'autres la représentent sans proposer de réelle corrélation avec l'intensité des précipitations simulées. Or, il s'agit là d'un point très important que nous allons développer plus en détail dans la suite du mémoire.

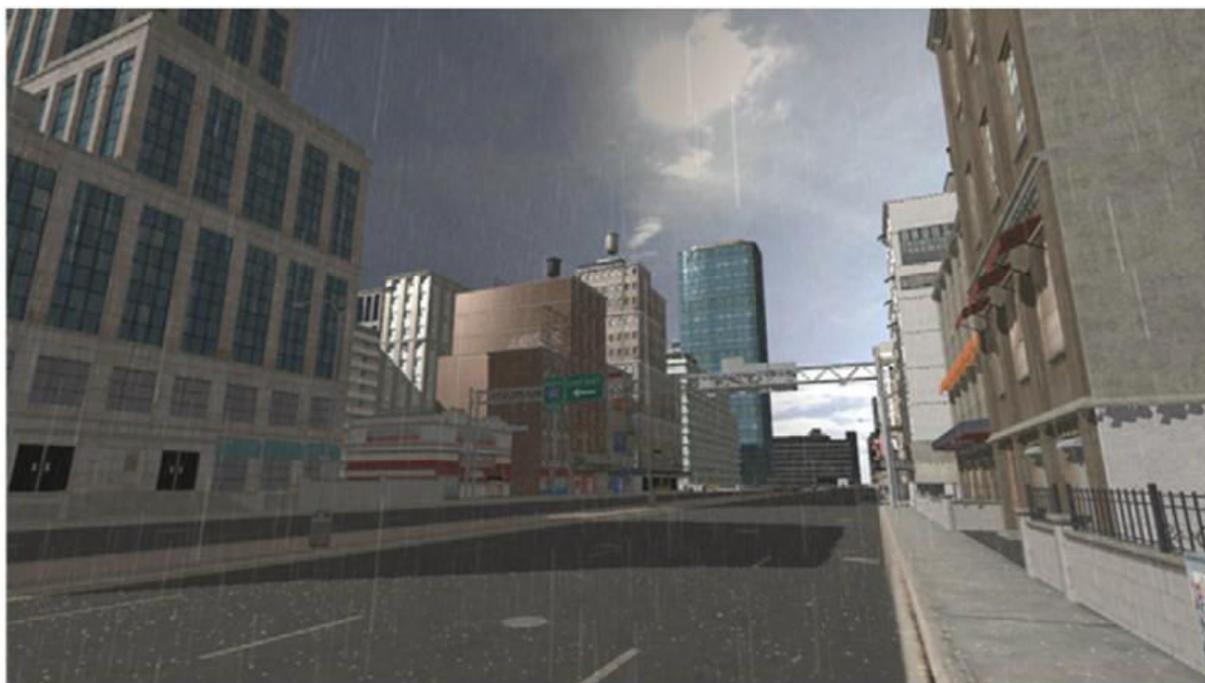


FIGURE 1.17 – Rendu de pluie par Creus et Patow [12]

## 1.2 Rendu des phénomènes atmosphériques

Cette seconde partie de l'état de l'art sur le rendu des phénomènes atmosphériques va nous permettre d'étudier les méthodes existantes simulant les interactions lumineuses dans la scène en présence de milieu participant. Nous nous sommes basés sur l'état de l'art des milieux participants de Cerezo et al [8], et plus spécifiquement sur l'état de l'art de Sloup [48] portant sur les phénomènes atmosphériques pour rédiger ce qui va suivre. Les méthodes proposant presque exclusivement de pouvoir observer la Terre depuis l'espace, ou bien simulant le rendu atmosphérique dans des cas trop spécifiques ne sont pas présentées dans ce mémoire ici. Il est également important de distinguer les méthodes simulant la diffusion simple et celles proposant la diffusion multiple. La diffusion simple implique que la lumière ne rebondit qu'une seule fois avant de parvenir à notre œil. Dans le cas de la diffusion multiple, la lumière peut rebondir à plusieurs reprises au sein du milieu participant avant d'atteindre l'observateur. Cette distinction est importante car la diffusion multiple implique généralement des méthodes et des algorithmes plus complexes à mettre à oeuvre. Dans ce mémoire, nous cherchons à proposer une méthode temps réel, et voulons donc limiter autant que possible d'avoir des calculs trop complexes et trop coûteux en temps de calcul. Le tableau 1.2 classe les méthodes selon ces deux critères.

Klassen [29] est le premier à proposer une méthode permettant de calculer la couleur du ciel. Il utilise des cercles concentriques de densité uniforme pour simuler l'air et les aérosols. La figure 1.18 explique comment évaluer la distance totale parcourue par la

Diffusion simple	[29] [20] [24] [21] [22] [19] [13] [42]
Diffusion multiple	[38] [39] [42] [5]

Tableau 1.2 – Classification des papiers sur le rendu des phénomènes atmosphériques

lumière pour parvenir à l’observateur. Cela permet de déterminer l’atténuation subie par la lumière durant son transport. Le point E correspond à la position de l’observateur et le point S à la position du soleil. Plutôt que de raisonner en RGB, Klassen effectue un échantillonnage spectral de façon à décomposer la couleur de chaque pixel en 33 longueurs d’ondes, et à calculer la contribution de chacune d’entre elles pour déterminer la couleur du ciel. Cela permet de prendre en compte le fait que chaque longueur d’onde ne subit pas la même déviation au contact des particules en suspension. Dans la vie réelle, les longueurs d’onde les plus courtes sont responsables de la couleur du ciel ; ce sont elles qui sont les plus diffusées dans l’atmosphère. La méthode intègre également le rendu du brouillard.

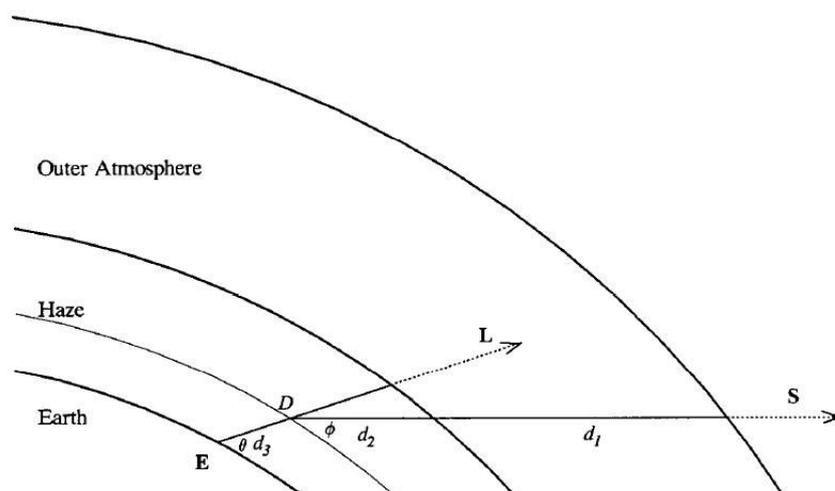


FIGURE 1.18 – Évaluation de la distance parcourue par la lumière [29]

Inakage [20] utilise un volume (appelé cube atmosphérique) englobant l’intégralité de la scène. Des particules de toutes tailles sont disposées à l’intérieur, déterminant ainsi la densité de l’atmosphère. Cette densité varie en chaque point du cube. Le modèle tient compte des diffusions de Rayleigh et de Mie ainsi que de l’absorption et de l’optique géométrique. La méthode d’Inakage permet de modéliser le ciel selon différentes conditions climatiques et pour différentes heures de la journée (ciel bleu, coucher de soleil, arc-en-ciel).

Kaneda et al [24] cherchent à améliorer le modèle de Klassen [29]. La densité des molécules d’air et des aérosols varie désormais de façon exponentielle en fonction de l’altitude. Le modèle tient compte des diffusions de Rayleigh et de Mie de façon à simuler les particules de toute taille dans l’atmosphère.



FIGURE 1.19 – Rendu atmosphérique de nuit par Inakage [20]



FIGURE 1.20 – Rendu atmosphérique par Kaneda et al [24]

Irwin [21] propose de visualiser l’atmosphère de la Terre depuis le sol et l’espace. Le modèle simule une atmosphère constituée d’air pur dont la densité varie de façon exponentielle. Le modèle ne prend en compte que les petites particules (théorie de Rayleigh). Irwin effectue une analyse spectrale consistant à raisonner en longueurs d’onde plutôt qu’avec le format RGB. Comme cela a été dit pour Klassen [29], cette décomposition de la lumière permet de représenter de façon plus réaliste le phénomène de diffusion.

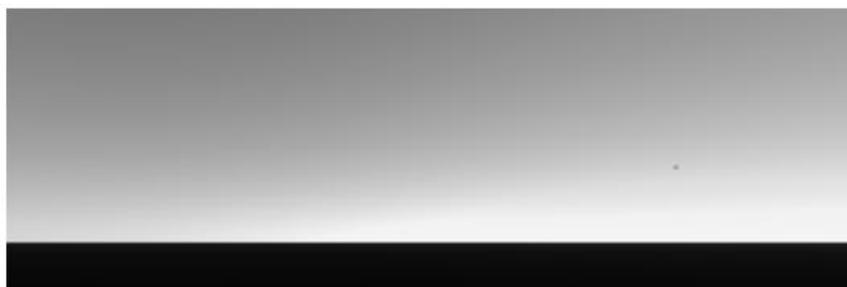


FIGURE 1.21 – Coucher de soleil par Irwin [21]

Nishita et al [38] s’inspirent des travaux de Kaneda et al [24] pour établir leur modèle. Ils prennent désormais en compte la diffusion multiple, mais uniquement de second ordre. La méthode prend en compte les théories de Rayleigh et de Mie pour évaluer la dispersion de la lumière due aux molécules d’air, aux aérosols et aux gouttes d’eau en suspension. Le ciel dans la scène est considéré comme étant une sphère divisée selon 8 directions. Parmi ces directions, on retrouve notamment la direction de la lumière, ou encore la direction horizontale le long de la surface de la Terre. La méthode se décline en 2 étapes. La première consiste à calculer la distribution de la lumière dans les 8 directions différentes, et à stocker les informations. La seconde collecte la quantité d’énergie reçue par l’observateur dans la direction de vue. Une interpolation tri-linéaire est alors effectuée à partir des valeurs stockées.

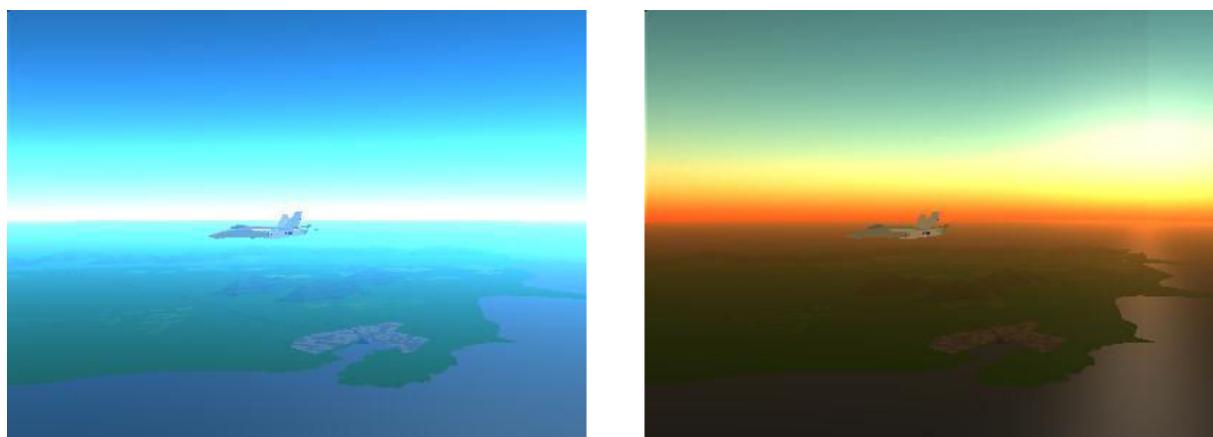


FIGURE 1.22 – Diffusion multiple par Nishita et al [38]

Jackèl et Walter [22] utilisent la théorie de Mie afin de proposer un modèle incluant différents phénomènes atmosphériques. La prise en compte des particules de tailles importantes dans l'atmosphère permet entre autres de modéliser les arcs-en-ciel et l'effet *airlight*. Jackèl et Walter représentent l'atmosphère au travers de plusieurs sphères concentriques. Cela leur permet de définir des couches différentes pour chaque type de particules (aérosols, molécules d'air, gouttes d'eau).

Preetham et al [39] proposent une solution peu coûteuse en temps calcul pour reproduire différentes conditions atmosphériques. Le modèle intègre notamment la perspective atmosphérique permettant de donner une illusion de profondeur ; le changement de couleur du ciel et des objets à l'horizon sont visibles sur la figure 1.24.

Hoffman et Preetham [19] continuent ces travaux en publiant un nouvel article quelques années plus tard. Notre modèle de dégradation de la visibilité se base sur cette publication, et l'explique en détail dans le chapitre 3. La figure 1.25 montre une scène avec une forte atténuation de la visibilité basée sur ce modèle.

Dobashi et al [13] pré-calculent et stockent les données correspondant à la diffusion de la lumière dans une texture. Cette méthode permet de connaître facilement la distribution de la lumière dans la scène, y compris lorsque la source lumineuse naturelle change de position. L'utilisation des possibilités de la carte graphique permet une mise à jour plus rapide, et donc une meilleure interaction avec la scène.

Dans la continuité de Jackèl et Walter [22], Riley et al [42] proposent eux aussi une méthode pour modéliser les phénomènes atmosphériques en prenant en compte les particules de taille importante. Ils utilisent notamment des fonctions de phase pour évaluer comment la lumière est diffusée dans la scène. Ces fonctions permettent de connaître la proportion de lumière renvoyée dans une certaine direction. Nous reviendrons plus en détail sur l'utilisation de ces fonctions dans les chapitres suivants.

Plus récemment, Bruneton et Neyret [5] proposent une méthode basée sur la diffusion multiple pour évaluer la dispersion de la lumière dans la scène. Le modèle permet de reproduire la couleur du ciel de jour ou au crépuscule, ainsi que les zones d'ombre et les rayons de lumière dans la scène. Leur modèle cherche tout d'abord à approcher l'équation du transport lumineux afin de pré-calculer tous les termes qui la composent pour tous les points de vue, pour n'importe quelle direction de vue et n'importe quelle direction de la lumière. Les informations sont stockées dans des tableaux 2D et 3D. L'utilisation d'une bibliothèque de données pré-calculées permet de garder un temps de calcul constant, quelle que soit l'intensité du phénomène à modéliser. L'inconvénient réside dans la phase de pré-calcul, bien que la quantité de données ne fasse au final que 8 Mo. Bruneton et Neyret ont cherché à optimiser l'occupation mémoire et ont proposé un algorithme pour réduire le temps de pré-calcul.

Les méthodes présentées proposent différents modèles de calculs pour le rendu des

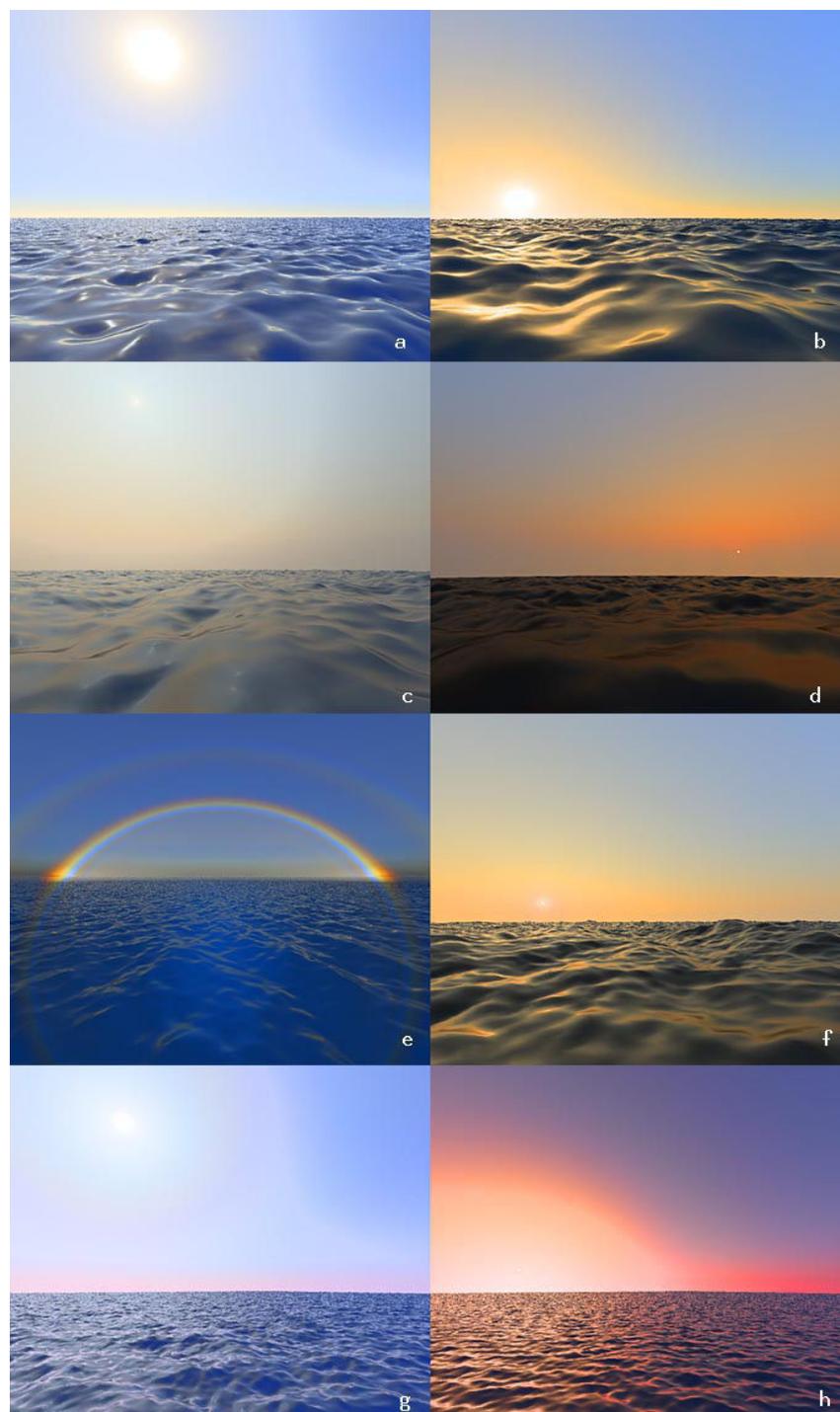


FIGURE 1.23 – Rendu atmosphérique par Jackèl et Walter [22]

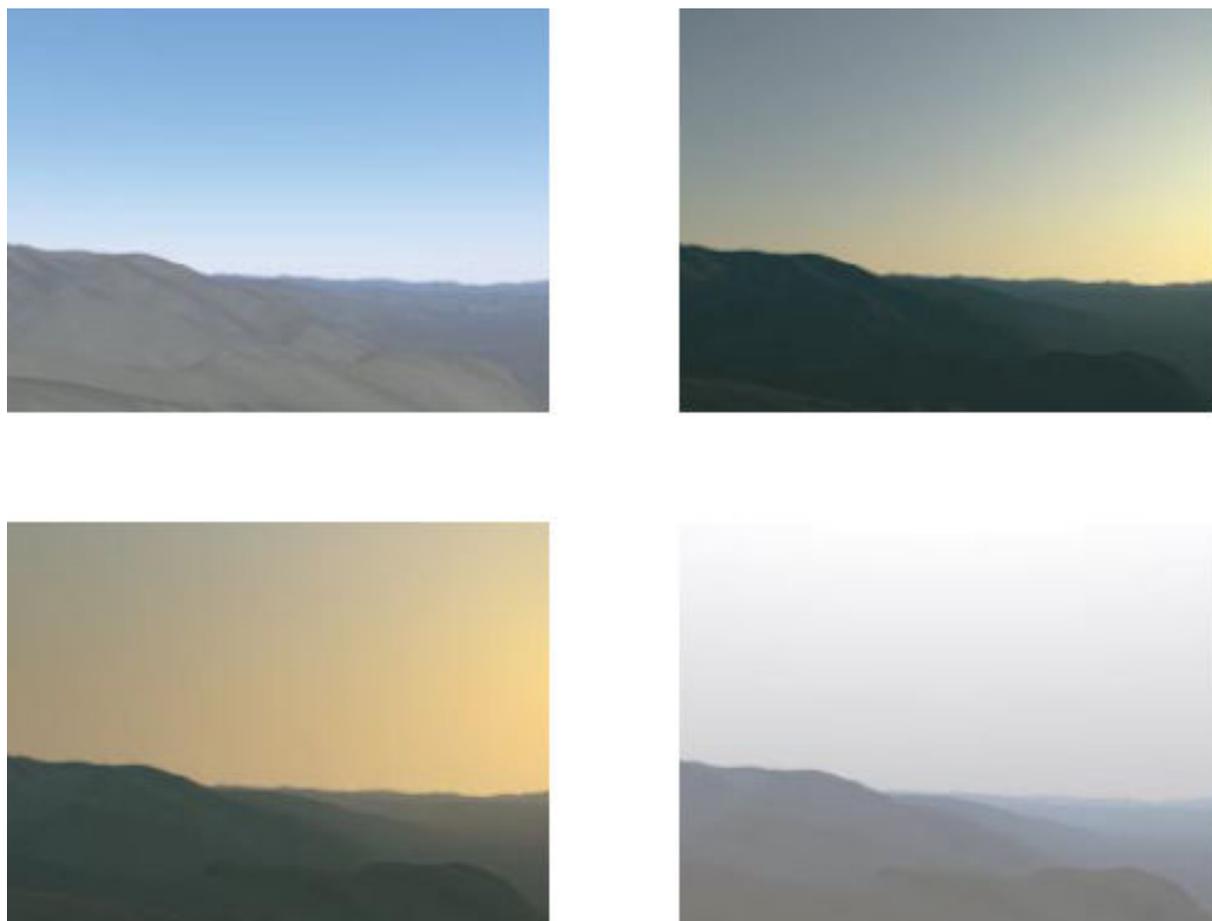


FIGURE 1.24 – Rendu d’une scène à différents moments de la journée et sous différentes conditions climatiques par Preetham et al [39]

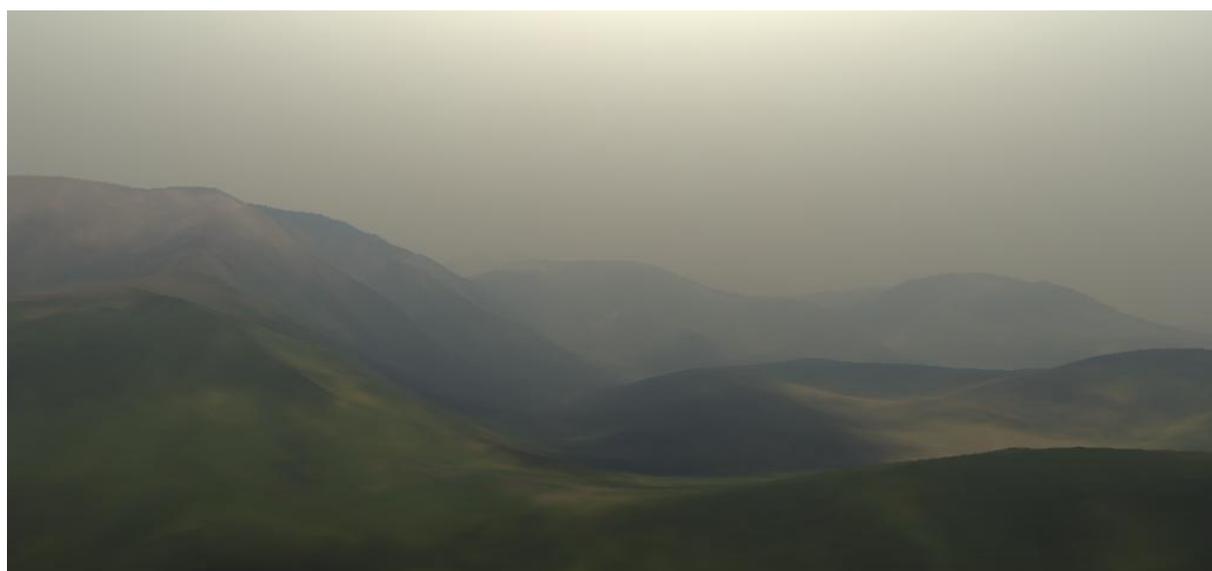


FIGURE 1.25 – Rendu du brouillard par Hoffman et Preetham [19]



FIGURE 1.26 – Rendu du ciel et des rayons du soleil par Dobashi et al [13]

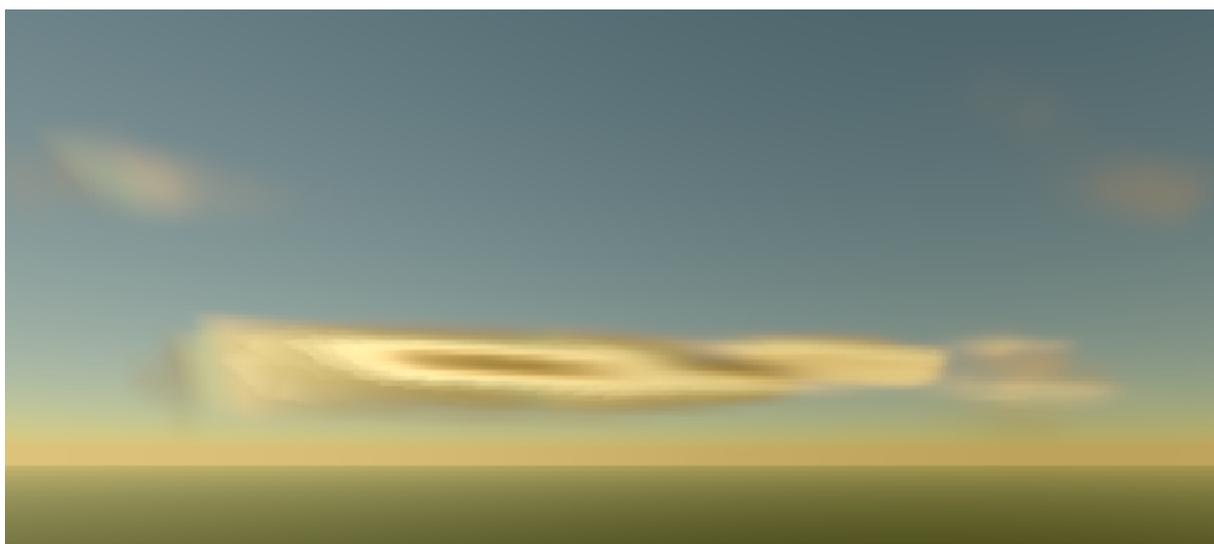


FIGURE 1.27 – Rendu atmosphérique par Riley et al [42]

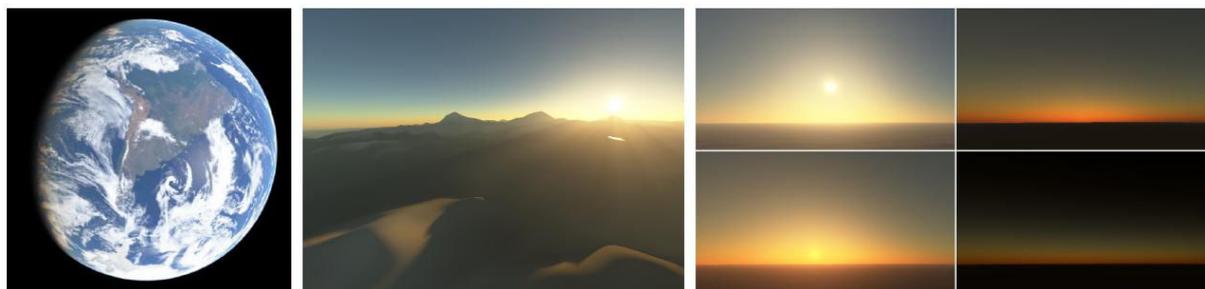


FIGURE 1.28 – Rendu atmosphérique depuis le ciel et la terre par Bruneton et Neyret [5]

phénomènes atmosphériques. Le modèle de Bruneton et Neyret [5] permet de gérer la diffusion multiple de la lumière dans la scène, et offrent d'excellents résultats visuellement. Néanmoins, la quantité de données pré-calculées reste un facteur non négligeable. Nous avons choisi de nous orienter davantage sur le modèle de diffusion simple de Hoffman et Preetham [19]. Ce modèle physiquement plausible présente les avantages de n'avoir aucun pré-calcul, et d'être totalement indépendant de la complexité de la scène. Nous le décrivons plus en détail dans le chapitre 3 consacré à notre méthode de rendu.

## 1.3 Synthèse

Ce premier chapitre nous permet d'observer les manques dans la littérature scientifique concernant le rendu de la pluie. Cette étude montre que les méthodes actuelles ne tiennent pas ou peu compte du caractère multi-échelle de la pluie. Certaines méthodes occultent totalement le rendu de la dégradation de la visibilité, tandis que d'autres représentent ce milieu participant sans proposer de réelle corrélation avec l'intensité des précipitations. L'étude dans le chapitre suivant va nous permettre de comprendre comment corréler la densité des gouttes visibles et l'atténuation de la visibilité, afin d'obtenir une simulation multi-échelle de pluie plus cohérente et réaliste.

Cet état de l'art met également en évidence les méthodes existantes pour le rendu des phénomènes atmosphériques. Certaines méthodes comme celle proposée par Bruneton et Neyret [5] offrent d'excellents résultats puisqu'elles permettent de reproduire plus fidèlement les interactions entre la lumière et les particules présentes dans l'environnement. Ce type de méthodes gère les multiples rebonds effectués par la lumière avant de parvenir à l'observateur généralement au détriment des temps de calcul et/ou de la quantité de données pré-calculées. D'autres méthodes en revanche basées sur une diffusion simple de la lumière offrent des résultats physiquement plausibles avec des temps de calcul réduits. Nous avons choisi d'utiliser le modèle de Hoffman et Preetham [19] pour représenter la dégradation de la visibilité par temps de pluie. Cette méthode offre des résultats visuellement convaincants dans le cas d'une simulation de pluie où la couverture nuageuse est généralement importante et l'ambiance pluvieuse est suffisamment homogène. Sauf en présence d'un arc-en-ciel, la pluie n'entraîne en effet que très peu de variations dans les couleurs - plutôt des niveaux de gris - et c'est la raison pour laquelle un modèle de diffusion simple de la lumière offre de bons résultats pour représenter la dégradation optique par temps de pluie. Le modèle de Hoffman et Preetham est présenté plus en détail dans le chapitre 3 consacré à notre méthode de rendu.

## Chapitre 2 :

# Étude sur la visibilité de la pluie : de la goutte à la dégradation optique

Ce chapitre a pour but de montrer que la pluie est perceptible selon deux échelles de visibilité : une échelle mésoscopique correspondant aux gouttes proches de l'observateur et visibles individuellement, et une échelle macroscopique où les gouttes entraînent plus globalement la création de ce que nous appelons un milieu participant. Nous nous basons dans ce chapitre sur les observations de Garg et Nayar [16] afin d'expliquer le caractère multi-échelle de ce phénomène. Nous présentons tout d'abord la perception des gouttes sous la forme de cordes à l'échelle mésoscopique, ainsi que la distribution des tailles de gouttes de Marshall et Palmer [34]. Nous expliquons ensuite comment le milieu participant engendré par la pluie peut être mathématiquement modélisé. Nous montrons enfin comment déterminer le coefficient d'extinction par temps de pluie en fonction de l'intensité des précipitations ; ce coefficient traduit la perte de radiance, le long du rayon de vue, causée par la présence des gouttes dans la scène.

## 2.1 La pluie, deux échelles de visibilité

Garg et Nayar [16] ont étudié la visibilité de la pluie et son impact sur les images. Ils ont montré que les gouttes proches de l'observateur sont visibles sur les images et entraînent une variation de l'intensité du pixel (Figure 2.1 (a)). Plus la distance à l'observateur croît, plus la variation diminue jusqu'à devenir insignifiante au delà d'une certaine distance. Au delà de cette distance, les gouttes sont trop petites et trop éloignées de l'observateur pour être visibles individuellement. Elles sont alors perçues sous la forme d'un brouillard et l'intensité du pixel ne varie que très peu d'une image à l'autre (Figure 2.1 (b)).

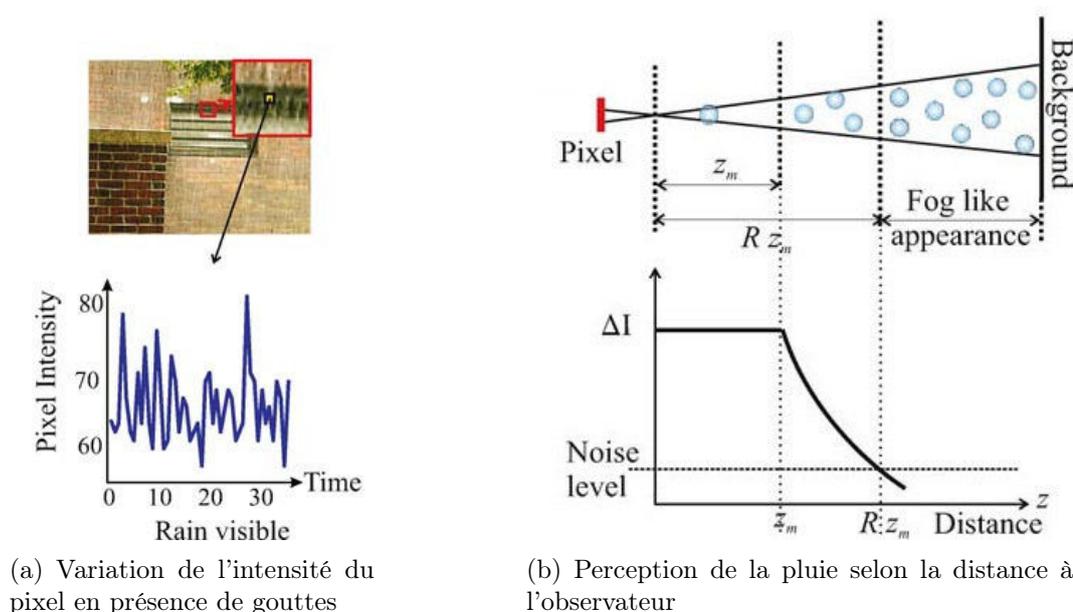


FIGURE 2.1 – Étude sur la visibilité de la pluie [16]

## 2.2 Échelle mésoscopique : les gouttes visibles

### 2.2.1 Perception des gouttes

Lorsqu'elles sont suffisamment proches de l'observateur, les gouttes, bien qu'étant petites voire très petites pour certaines, sont généralement visibles à l'œil nu. Elles sont perçues sous la forme de cordes du fait de la persistance rétinienne dans le cas de la vision humaine, ou du temps d'exposition pour un dispositif électronique. Dans le cas d'une caméra ou d'un appareil photo, cette apparence est due à ce que l'on appelle plus spécifiquement la vitesse d'obturation de l'appareil. Pendant le laps de temps où l'obturateur est ouvert et laisse passer la lumière, la goutte d'eau continue sa chute et laisse ainsi une trace sur l'image finale. La vitesse terminale d'une goutte étant assez élevée - de l'ordre de  $10 \text{ m.s}^{-1}$  pour une goutte de  $5 \text{ mm}$  - cette dernière a le temps de parcourir une certaine distance, et ce malgré une vitesse d'obturation élevée. Plus la vitesse d'obturation est importante, plus le temps laissé à la lumière pour atteindre la surface sensible est court. A l'inverse, un temps d'exposition trop long va avoir pour effet d'accroître la trace laissée par les gouttes ; les cordes seront alors perçues de façon plus allongée. Notons que dans la suite du mémoire, nous allons parler de temps d'exposition, ce dernier correspond au temps pendant lequel la surface sensible de l'appareil est exposée et reçoit de la lumière.

### 2.2.2 Empreinte d'une goutte

En connaissant le temps d'exposition  $T$  de l'appareil et le diamètre  $D$  de la goutte, il nous est possible de calculer la taille de la trace ou de l'empreinte  $E$  laissée par une goutte sur l'image finale.

Nous déterminons tout d'abord la hauteur d'une goutte dans l'espace monde en tenant compte du temps d'exposition de la caméra. Introduisons pour cela la fonction  $y(D, T)$ .

$$y(D, T) = 10^{-3}[D + v(D)T] \quad (m), \quad (2.1)$$

avec  $v(D)$  la vitesse terminale d'une goutte,

$D$  le diamètre de la goutte en  $mm$ .

Garg et Nayar [16] rappelle à ce sujet que la vitesse d'une goutte peut être exprimée comme suit :

$$v(D) = 10 \times \sqrt{\frac{D}{5}} \quad (m.s^{-1}). \quad (2.2)$$

La fonction  $y(D, T)$  donne la hauteur des cordes en  $m$  en fonction du temps

d'exposition de la caméra et de la taille des gouttes. Pour calculer l'empreinte d'une goutte dans l'espace écran cette fois, nous avons besoin d'introduire la matrice de projection et le produit matriciel suivants :

$$\begin{bmatrix} \frac{f}{a_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{z_f+z_n}{z_n-z_f} & \frac{2z_fz_n}{z_n-z_f} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ w_c \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

avec  $a_s$  est le ratio d'aspect,

$z_n$  et  $z_f$  le cône de vision et,

$$f = \tan^{-1} 0.5f_{ov}, \quad (2.4)$$

avec  $f_{ov}$  l'angle d'ouverture de la caméra.

Nous nous intéressons dans le cas des gouttes uniquement au calcul de la projection sur l'axe vertical  $y$ . Seulement la hauteur de projection des cordes nous importe ; nous pouvons déduire la largeur en utilisant un simple ratio. Le produit matriciel ci-dessus nous donne les relations suivantes :

$$y_c = fy, \quad (2.5)$$

et

$$w_c = z. \quad (2.6)$$

Les coordonnées dans l'espace écran sont ensuite obtenues en divisant chaque dimension par  $w_c$ .  $z$  correspond ici à la distance entre la goutte et l'observateur.

$$y_v = \frac{y_c}{w_c}. \quad (2.7)$$

Nous rappelons que les coordonnées dans l'espace écran sont comprises dans l'intervalle  $[-1 ; 1]$ . L'empreinte  $E$  laissée par une goutte en pixel sur l'écran, donc après projection, s'exprime ainsi :

$$E = 0.5y_vh, \quad (2.8)$$

avec  $h$  la résolution de la fenêtre sur l'axe vertical.

$E$  peut être réécrit ainsi :

$$E = \frac{f y h}{2z}. \quad (2.9)$$

La variable  $y$  peut également être remplacée par la fonction  $y(D, T)$ . Nous pouvons ainsi réécrire  $E$  en fonction de la taille de la corde  $y(D, T)$  dans l'espace monde en réintégrant  $f_{ov}$  dans l'équation.

$$E(D, T, h, f_{ov}, z) = \frac{y(D, T)h}{2z \tan 0.5 f_{ov}}. \quad (2.10)$$

Comme illustré dans la Figure 2.2, il est à noter que deux cordes de tailles différentes peuvent avoir la même taille une fois projetées à l'écran selon leur distance par rapport à l'observateur.

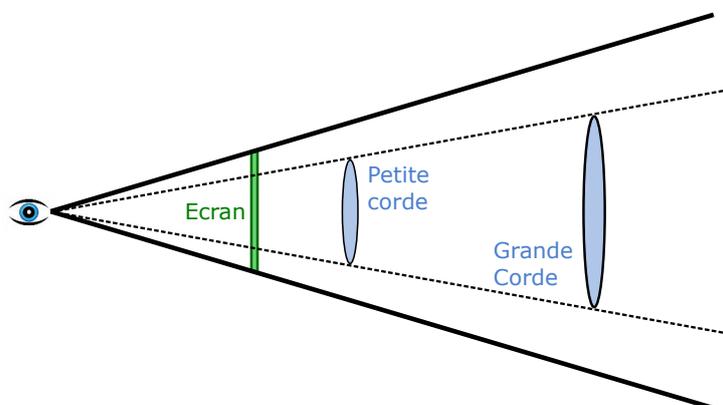


FIGURE 2.2 – 2 cordes de tailles différentes peuvent avoir la même taille de projection selon leur distance à l'observateur.

### 2.2.3 Apparence des cordes

Quand l'obturateur de la caméra laisse entrer la lumière, l'empreinte perçue sur l'image finale correspond en réalité à plusieurs positions successives d'une même goutte du fait du temps d'exposition. Cela revient mathématiquement à additionner la contribution de chaque position successive pour un pixel donné (Figure 2.3).

Garg et Nayar [16] rappellent la forme fonctionnelle permettant de représenter une goutte à un instant donné en tenant compte de ses différents modes d'oscillation au cours du temps. Cette représentation fonctionnelle a été notamment utilisée par Rousseau et al [46] pour le rendu des cordes en discrétisant l'espace et calculant la contribution de chacune des instances de gouttes sur un certain laps de temps. Nous n'utiliserons cette forme fonctionnelle que dans la seconde partie du mémoire pour le rendu des égouttements, et nous n'allons donc pas développer cet aspect pour le moment dans ce chapitre. Pierre

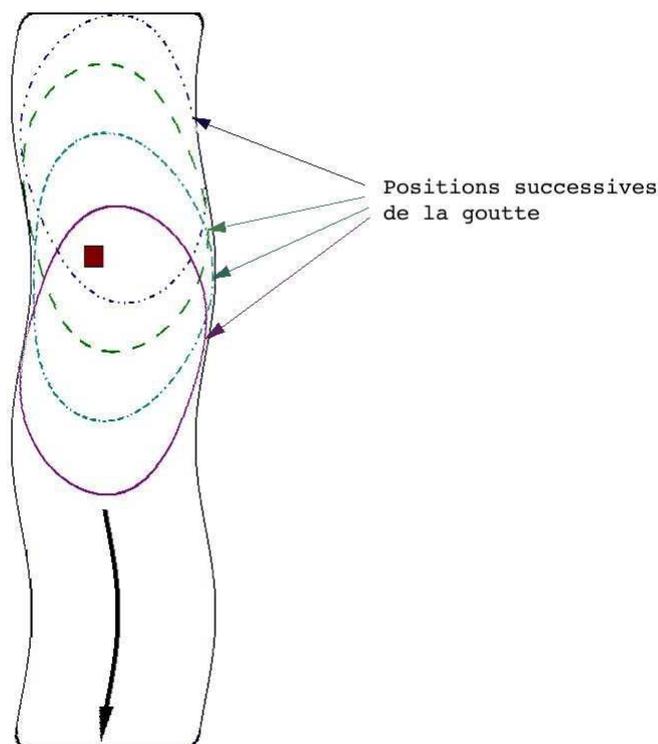


FIGURE 2.3 – Rousseau et al [46] expliquent que le pixel reçoit la contribution de chaque instance d’une même goutte à différents instants

Rousseau a également présenté dans son mémoire de thèse [44] une étude sur l’apparence des gouttes en tenant compte de la réfraction de la lumière. Cela lui permet de représenter les cordes d’une façon physiquement réaliste et de tenir compte des lumières de la scène. La méthode proposée dans le chapitre suivant ne se basant pas dessus, nous ne développerons pas ceci dans cette étude.

L’apparence des cordes s’avère donc être très complexe à modéliser et tout particulièrement car elle dépend également des lumières de la scène. L’oscillation, la réfraction ainsi que la position de l’observateur et des lumières modifient la perception que nous avons des gouttes. C’est la raison pour laquelle Garg et Nayar [15] ont préféré pré-calculer une bibliothèque de textures de corde pour leur méthode de rendu (Figure 2.4). Cela leur permet de minimiser les temps de calcul et de parvenir à un rendu réaliste en tenant compte des propriétés de la scène. Les cordes de cette bibliothèque sont classifiées en fonction de la direction de vue et de la direction incidente de la lumière afin de savoir quel motif de corde utilisé à tout moment.

## 2.2.4 Distribution des tailles de gouttes

Nous avons vu ci-dessus comment les gouttes sont perçues par l’observateur et comment elles doivent être représentées. Il reste un dernier élément très important à

$\theta_{view}$	110°						90°						70°					
$\theta_{light}$	130°		90°		50°		130°		90°		50°		130°		90°		50°	
$\phi_{light}$	130°	10°	70°	30°	10°	150°	30°	10°	110°	50°	170°	30°	170°	90°	110°	50°	130°	30°
Real Images of Rain Streaks																		
Rendered Rain Streaks																		

FIGURE 2.4 – Bibliothèque de textures de Garg et Nayar [15]

présenter dans cette analyse : la distribution des tailles de gouttes.

Certains chercheurs tels que Marshall et Palmer [34] ont étudié la distribution des tailles de gouttes il y a plusieurs décennies. Ces derniers ont d'ailleurs proposé une estimation du nombre de gouttes par volume selon l'intensité des précipitations  $\mathcal{I}$  et le diamètre  $D$  des gouttes.

$$N(D, \mathcal{I}) = N_0 e^{-\Lambda_{\mathcal{I}} D} \quad (m^{-3}.mm^{-1}) \quad (2.11)$$

où

$$N_0 = 8000 \quad (m^{-3}.mm^{-1}) \quad (2.12)$$

et

$$\Lambda_{\mathcal{I}} = 4.1\mathcal{I}^{-0.21} \quad (mm^{-1}) \quad (2.13)$$

Le nombre de gouttes par  $m^{-3}$  pour un intervalle de taille de gouttes  $\delta D$  s'obtient en calculant  $N(D, \mathcal{I})\delta D$ . Cette distribution a été très largement utilisée par le passé, et c'est sur elle que nous allons nous appuyer dans cette partie du mémoire. Grâce à cette distribution, nous sommes capables d'estimer le nombre de gouttes à représenter pour un intervalle de taille donné et cela en fonction de l'intensité de la pluie.

## 2.3 Échelle macroscopique : la dégradation optique

### 2.3.1 La pluie, un milieu participant

L'un des objectifs de ce mémoire est de parvenir à simuler la dégradation de la visibilité par temps de pluie. De ce fait, il est indispensable de comprendre comment la lumière se comporte dans la scène selon les conditions météorologiques, et plus précisément selon le type de particules en suspension dans l'air. Cette étude physique s'appuie sur les travaux de Wojciech Jarosz [23] concernant les milieux participants et sur le papier de Bruneton et Neyret [5].

En présence de conditions météorologiques dégradées, le brouillard, la pluie ou encore la neige entraînent une modification de la propagation de la lumière à travers la scène, et engendrent un phénomène dit d'extinction. On parle aussi d'une dégradation de la transmission optique. Les objets observables par temps clair ne sont plus perçus de la même façon selon les conditions atmosphériques. Dans le cas de la pluie, l'ensemble des gouttes présentes dans l'air dans la scène entraîne la création de ce que nous appelons un *milieu participant*, milieu dans lequel un grand nombre d'interactions lumineuses ont lieu. Toutes les gouttes ont pour effet de perturber la trajectoire initiale de la lumière et cela engendre une atténuation de la visibilité plus ou moins significative, selon l'intensité des précipitations.

---

« ... Les milieux participants influencent tout ce que nous observons autour de nous : de la couleur du ciel au coucher du soleil à l'apparence du lait en passant par la réduction de visibilité en présence de brouillard ou de pluie... »

Wojciech Jarosz [23]

---

On distingue 4 types d'interaction (Figure 2.5) dans un milieu participant. L'absorption et la diffusion sortante ont pour effet de diminuer la radiance dans la direction incidente de la lumière. L'émission et la diffusion entrante ont quant à elles l'effet inverse. La somme de l'absorption et la diffusion sortante est appelée *extinction*.

### 2.3.2 Absorption et diffusion sortante

Lorsque le rayon de lumière rencontre des particules en suspension, une partie de l'énergie transportée peut se transformer en chaleur ; ce premier phénomène s'appelle l'absorption. Cela engendre donc une diminution de la quantité de la lumière dans la direction incidente. Pour comprendre plus précisément le processus d'absorption, Hoffman

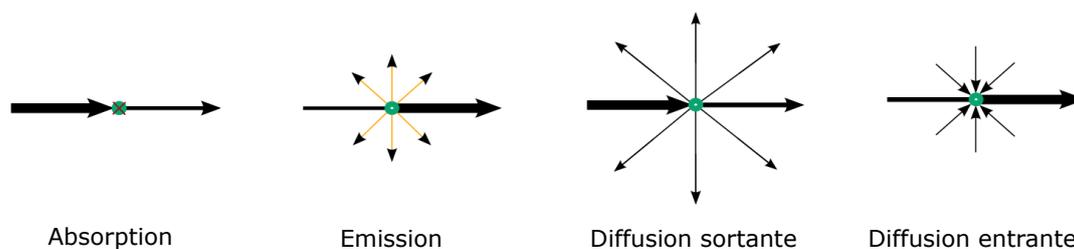


FIGURE 2.5 – Les 4 types d'interaction dans un milieu participant [23]

et Preetham [19] reviennent sur la notion de section efficace d'absorption (Figure 2.6). La section efficace d'absorption correspond à l'aire absorbant la lumière incidente en chaque point, pour une longueur d'onde donnée. Cela caractérise la probabilité d'absorption d'une partie de l'énergie. L'unité est le mètre carré ( $m^2$ ).

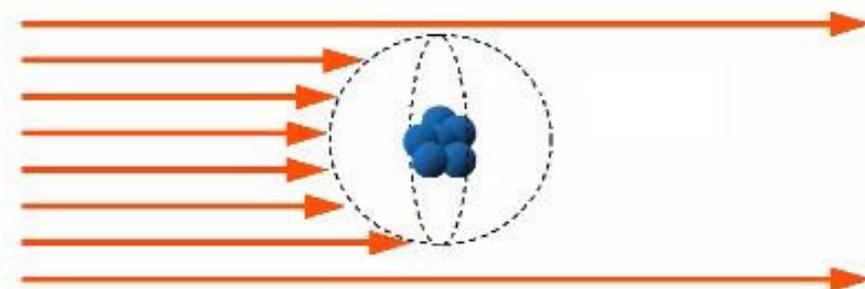


FIGURE 2.6 – Section efficace d'absorption [19]

Le coefficient d'absorption se calcule à partir de la section efficace d'absorption  $\sigma^a$  et de la densité volumique de particules  $\rho^a$ .

$$\beta^a = \sigma^a \rho^a. \quad (2.14)$$

$$\beta^d = \sigma^d \rho^d. \quad (2.15)$$

La somme des deux phénomènes (absorption et diffusion sortante) est appelée l'extinction. Nous expliquons à la fin de cette étude physique comment le coefficient d'extinction peut être calculé pour le cas de la pluie.

$$\beta^e = \beta^a + \beta^d. \quad (2.16)$$

Il est possible d'évaluer la proportion d'absorption et de diffusion d'un milieu avec l'albédo de diffusion simple, noté  $\omega$ . Quand  $\omega$  vaut 0, le milieu est purement absorbant ;

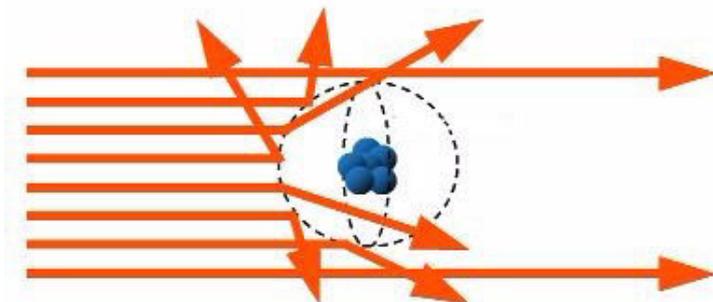


FIGURE 2.7 – Section efficace de diffusion sortante [19]

quand  $\omega$  vaut 1, le milieu est purement diffus.

$$\omega = \frac{\beta^d}{\beta^a + \beta^d} = \frac{\beta^d}{\beta^e} \quad (2.17)$$

A partir du coefficient d'extinction, nous exprimons l'épaisseur optique  $\tau$ .

Dans le cas d'un milieu hétérogène, l'extinction varie dans l'espace et il est nécessaire dans ce cas d'intégrer l'extinction sur l'intégralité du chemin  $xx_0$  parcouru par la lumière. De plus, si le milieu est composé de différents types de particules, l'intégrale se transforme en l'intégrale de la somme des extinctions pour l'ensemble des particules présentes.

$$\tau(x, x_0) = \int_x^{x_0} \sum_{i \in \{R, M\}} \beta_i^e(x') dx' \quad (2.18)$$

En informatique graphique, le milieu participant est souvent considéré comme étant homogène. Si l'on considère également que le coefficient d'extinction est un coefficient moyen simulant l'atténuation pour l'ensemble des tailles de gouttes, l'équation se simplifie ainsi :

$$\tau(x, x_0) = \beta^e d \quad \text{avec } d = \|\overrightarrow{xx_0}\| \quad (2.19)$$

La transmittance  $T_r$  d'un milieu se traduit par le rapport entre la radiance  $L$  parvenant à l'observateur en  $x_0$  et la radiance partant en  $x$  dans la direction de vue  $\vec{v}$ . La transmittance permet de décrire la transparence du milieu participant. Elle mesure la perte de radiance due à l'absorption et la diffusion sortante.

$$T_r(x, x_0) = \frac{L(x_0, \vec{v})}{L(x, \vec{v})} \quad \text{avec } \vec{v} = \overrightarrow{xx_0} \quad (2.20)$$

La transmittance peut également s'écrire en fonction de l'épaisseur optique  $\tau$  grâce à la Loi de Beer-Lambert. Cette loi se base sur l'idée que l'intensité de la lumière dans un

milieu décroît en fonction de la distance parcourue et de la densité des acteurs absorbants du milieu. En présence de pluie, la visibilité est réduite et l'épaisseur optique est considérée comme étant importante.

$$T_r(x, x_0) = \exp[-\tau(x, x_0)] \quad (2.21)$$

A partir des équations 2.20 et 2.21, la radiance atténuée en  $x_0$  peut être exprimée en fonction de la radiance en  $x$  et de la profondeur optique  $\tau$ . Nous renommons ici la radiance atténuée en radiance sortante ou  $\mathcal{S}_{ort}$ .

$$\mathcal{S}_{ort}(x, x_0) = T_r(x, x_0)L(x, \vec{v}) \quad (2.22)$$

### 2.3.3 Diffusion entrante

Garg et Nayar [16] expliquent le comportement de la lumière au contact des particules en suspension dans l'air (Figure 2.8). La taille des particules influence la façon dont la lumière va se diffuser à leur contact. Si la particule est beaucoup plus grosse que les longueurs d'onde visibles, comme dans le cas des gouttes de pluie, la lumière va pénétrer dans la goutte d'eau et va principalement ressortir dans la direction incidente.

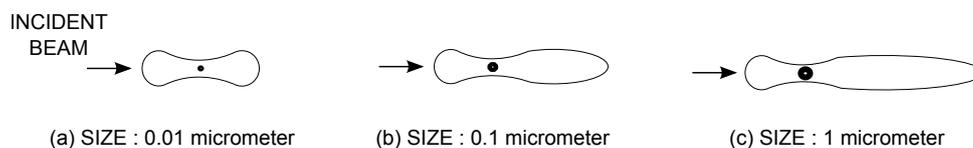


FIGURE 2.8 – Comportement de la lumière au contact des particules en fonction de leur taille [16]

Si le phénomène de diffusion sortante implique une diminution de la quantité de lumière dans la direction incidente, il implique également une augmentation dans les autres directions. Si l'on souhaite simuler de façon réaliste un milieu participant, il est nécessaire de prendre en compte la diffusion entrante qui a pour conséquence d'augmenter la radiance dans la direction de l'observateur. Pour cela, nous devons connaître la quantité de lumière renvoyée dans une certaine direction. Or, les coefficients précédemment calculés n'apportent aucune information à ce sujet. Nous devons disposer de fonctions permettant de définir la proportion de lumière renvoyée dans une direction donnée, selon une direction incidente, en prenant en compte la taille et la forme des particules. Pour ce faire, nous allons maintenant introduire les fonctions de phase relatives aux théories de Rayleigh et de Mie.

La fonction de phase de Rayleigh est utilisée pour les particules de petite taille. Elle nous permet de prendre en compte l'ensemble des molécules présentes dans l'atmosphère.

La figure 2.9 illustre comment cette fonction de phase distribue la lumière.

$$\mathcal{P}_R(\theta) = \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2 \theta) \quad (2.23)$$

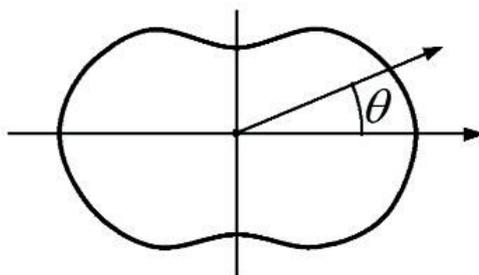


FIGURE 2.9 – Distribution de la fonction de phase de Rayleigh  $\mathcal{P}_R$  [19]

La fonction de phase de Henyey-Greenstein décrit quant à elle le comportement de la lumière au contact de particules sphériques de taille importante. Cette fonction est une bonne approximation de la fonction de phase de Mie. Elle nous est particulièrement utile pour le cas de pluie. Jarosz [23] explique que la fonction de phase de Henyey-Greenstein est clairement la fonction la plus utilisée pour représenter l'interaction entre la lumière et les particules sphériques ayant une taille plus importante que les longueurs d'onde visibles. Nous considérons par simplicité que les gouttes d'eau sont sphériques afin de respecter cette contrainte. La fonction de phase de Henyey-Greenstein est la suivante :

$$\mathcal{P}_M(\theta) = \frac{(1 - g)^2}{4\pi (1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.24)$$

avec  $g$  l'excentricité.

La valeur de ce coefficient varie entre  $[-1 ; 1]$ . En manipulant ce paramètre, l'utilisateur peut ainsi faire varier la direction principale dans laquelle la diffusion de la lumière va s'effectuer (Figure 2.10). Dans le cas de la pluie, la valeur de  $g$  doit être supérieure à 0 de façon à ce que la lumière soit davantage diffusée dans la direction incidente.

Nous pouvons maintenant définir la diffusion entrante de la lumière  $L_e$  en  $x'$  depuis toutes les directions  $\vec{\omega}$  et repartant dans la direction de vue  $\vec{v}$  en tenant compte de l'ensemble des particules présentes.

$$L_e(x', \vec{v}) = \int_{4\pi} \sum_{i \in \{R, M\}} \beta_i^d(x') \mathcal{P}_i(\vec{v} \cdot \vec{\omega}) L(x', \vec{\omega}) d\omega \quad (2.25)$$

La radiance entrante  $\mathcal{E}_{nt}$  peut maintenant être exprimée à partir de l'Équation 2.25. Il

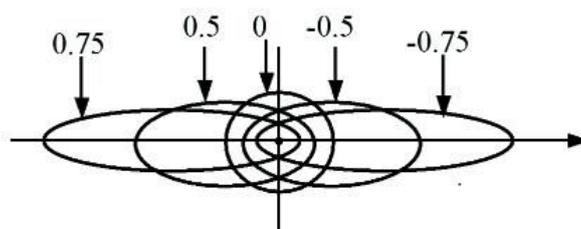


FIGURE 2.10 – Distribution de la fonction de phase de Mie  $\mathcal{P}_M$  en fonction de l'excentricité  $g$  [19]

suffit d'intégrer la diffusion entrante sur l'intégralité du chemin entre  $x$  et  $x_0$  en considérant que la lumière entrante va également subir une atténuation sur la distance restante avant de parvenir à l'observateur. Nous utilisons pour cela l'équation de la transmittance vue dans la section précédente.

$$\mathcal{E}_{nt}(x, x_0) = \int_x^{x_0} T_r(x', x_0) L_e(x', \vec{v}) dx' \quad (2.26)$$

### 2.3.4 Équation du transfert de la lumière

L'équation du transfert de la lumière peut être résumée comme étant l'addition de la radiance entrante  $\mathcal{E}_{nt}$  et sortante  $\mathcal{S}_{ort}$ .

$$L(x_0, \vec{v}) = \mathcal{E}_{nt}(x, x_0) + \mathcal{S}_{ort}(x, x_0) \quad (2.27)$$

Il est à noter que cette équation est très difficile à résoudre en l'état, et d'autant plus si l'on considère les multiples rebonds de la lumière au sein d'un milieu participant avant de parvenir à l'observateur ; d'où la nécessité de faire un certain nombre d'approximations afin de simplifier la résolution de l'équation du transfert de la lumière. Le terme le plus complexe à évaluer est en l'occurrence le terme correspondant à la radiance entrante le long du chemin  $xx_0$ .

### 2.3.5 Extinction par temps de pluie

Nous proposons pour terminer cette étude physique de calculer le coefficient d'extinction  $\beta^e$  selon l'intensité de la pluie, en se basant sur la distribution de Marshall et Palmer [34], distribution déjà introduite dans la partie consacrée à l'échelle mésoscopique. L'extinction, composée de l'absorption et de la diffusion sortante, doit être estimée par temps de pluie en fonction de la distribution des gouttes dans la scène et donc de l'intensité de la pluie. L'extinction est généralement considérée comme étant constante par simplicité

dans un milieu participant dans le cas de simulation temps réel. Nous allons faire ici le même postulat en considérant la pluie comme étant un phénomène homogène.

Atlas [2] indique que le coefficient d'extinction  $\beta^e$ , dû au contact de la lumière avec des particules sphériques de taille importante, s'écrit :

$$\beta^e = 2\pi \sum_i N_i r_i^2 \quad (2.28)$$

avec  $N_i$  le nombre de particules par unité de volume selon leur rayon  $r_i$ .

L'auteur de cet article indique que le coefficient d'extinction, et plus précisément le terme  $N_i r_i^2$ , peut être défini en fonction des quantités de précipitations. L'objectif est donc de disposer d'une relation permettant de calculer le coefficient d'extinction en fonction du type de pluie.

Atlas introduit la notion de visibilité météorologique, notée  $V_{met}$ , permettant d'évaluer dans notre cas la visibilité à travers la pluie. Il s'agit, d'une manière générale, de la plus grande distance à laquelle on peut distinguer un objet noir de dimensions convenables sur un fond de ciel. La CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) a fixé une valeur moyenne de 0.05, soit 5%, pour le seuil de contraste. Ainsi, l'objet n'est plus clairement visible lorsque son contraste par temps clair diminue de 95%. Atlas choisit quant à lui d'utiliser une valeur de seuil de 0,055. La visibilité météorologique dépend évidemment du coefficient d'extinction du milieu ; plus le coefficient d'extinction augmente, plus la visibilité météorologique diminue.

$$V_{met} = B^{e-1} \ln(0.055^{-1}) \approx \frac{2.9}{\beta^e}. \quad (2.29)$$

Atlas et Bartnoff montrent que  $V_{met}$  peut également s'écrire de la façon suivante :

$$V_{met} = 10^6 [0.744 K(n) \frac{d_0}{W}], \quad (2.30)$$

avec  $d_0$  le diamètre volumique médian, correspondant au diamètre divisant le contenu en eau liquide  $W$  en deux parties égales,

$K(n)$  le coefficient sans dimension en rapport avec la distribution des gouttes.

Les valeurs de  $K(n)$  pour  $n$  allant de 0 à 10 correspondent au spectre du modèle *multicylinder family*. Ce modèle a pour but de proposer différentes valeurs de  $K$  selon  $n$  afin de qualifier le caractère monodispersé de la distribution. Une distribution monodispersée ( $n = 0$ ) comprend des particules de même taille ou de tailles voisines.

Les relations suivantes sont déduites des résultats obtenus par Marshall et Palmer :

$$d_0 = 0.92 \mathcal{I}^{0.21} \quad (mm), \quad (2.31)$$

Spectre $n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K(n)$	1.30	1.27	1.22	1.16	1.07	0.97	0.86	0.74	0.61	0.49	0.38

Tableau 2.1 – Valeur du coefficient  $K(n)$ 

et

$$W = 72\mathcal{I}^{0.88} \quad (mg.m^{-3}), \quad (2.32)$$

avec  $\mathcal{I}$  l'intensité des précipitations en  $mm.h^{-1}$ .

Grâce aux équations 2.30, 2.31 et 2.32, nous pouvons exprimer  $V_{met}$  en fonction de  $\mathcal{I}$ . Concernant  $K(n)$ , Atlas précise que la distribution de Marshall et Palmer [34] correspond à  $K(n) \approx 1$  avec une valeur de  $n$  comprise entre 4 et 5.  $V_{met}$  peut ainsi s'écrire :

$$V_{met} = 9.3\mathcal{I}^{-0.67} \quad (km). \quad (2.33)$$

En utilisant l'équation 2.29, on peut déduire le coefficient d'extinction  $\beta^e$  en fonction de l'intensité de la pluie  $\mathcal{I}$  :

$$\beta^e = 0.312\mathcal{I}^{0.67} \quad (km^{-1}). \quad (2.34)$$

Nous proposons des valeurs de  $\mathcal{I}$  dans le tableau 2.2 et nous utilisons l'équation 2.34 pour calculer le coefficient d'extinction pour différentes intensités de pluie.

Type de pluie	$\mathcal{I}(mm.h^{-1})$	$\beta^e(km^{-1})$
Légère	2	0.50
Modérée	5	0.92
Forte	25	2.70
Très forte	75	5.63

Tableau 2.2 – Calcul du coefficient d'extinction selon l'intensité des précipitations

## 2.4 Synthèse

Nous avons montré dans ce chapitre que la phénomène de pluie est perceptible selon deux échelles de visibilité : une échelle mésoscopique correspondant aux gouttes visibles individuellement et une échelle macroscopique où les gouttes engendrent un milieu participant. Il convient de prendre en compte cet aspect multi-échelle pour obtenir un rendu de pluie cohérent et réaliste. De plus, les deux échelles de visibilité se doivent d'être corrélées. En effet la perception du milieu participant, aussi bien le facteur d'atténuation que la diffusion entrante, est clairement dépendante de la distribution des gouttes dans la scène, idem pour la densité des gouttes visibles au premier plan.

Nous avons présenté la distribution de Marshall et Palmer [34] afin d'avoir une estimation du nombre de gouttes pour un volume et un diamètre de gouttes donnés. Nous avons également montré comment le coefficient d'extinction peut être évalué en fonction de cette même distribution. En proposant un rendu des cordes et de la dégradation optique basés sur cette distribution, nous pouvons ainsi assurer une corrélation entre les deux échelles de visibilité. De plus, cette distribution présente l'avantage d'être simple à évaluer mais aussi d'être contrôlée au travers d'un seul paramètre d'entrée : l'intensité des précipitations. Faire varier cet unique paramètre permettrait à la fois de mettre à jour la densité des cordes visibles au premier plan et de modifier l'atténuation de visibilité en arrière plan. Le chapitre suivant a pour but d'introduire une nouvelle méthode multi-échelle pour le rendu de la pluie à partir des observations qui ont été faites tout au long de cette étude physique.

## Chapitre 3 :

# Modèle multi-échelle pour le rendu de la pluie en temps réel

Ce chapitre présente une nouvelle méthode de rendu de pluie multi-échelle, post-processing et basée espace écran, indépendante de la complexité de la scène, capable de prendre en compte et de corrélérer l'atténuation de la visibilité en arrière plan et la densité des cordes visibles au premier plan. Cette méthode s'appuie sur l'analyse présentée dans le chapitre précédent.

### 3.1 Contexte

L'étude du chapitre précédent a montré l'importance de disposer d'un modèle multi-échelle pour obtenir un rendu de pluie à la fois cohérent et réaliste. Une scène pluvieuse comprend un très grand nombre de gouttes d'eau. Chacune de ces gouttes est beaucoup plus grande que les longueurs d'onde visibles et cela entraîne une perturbation dans la diffusion de la lumière. Les gouttes ayant une taille de projection supérieure à un pixel sont visibles individuellement par la caméra. Les autres gouttes trop petites ou trop éloignées sont perçues à une échelle plus globale en tant que milieu participant. Ce milieu dans lequel des interactions lumières/gouttes vont avoir lieu a pour conséquence de perturber la direction incidente de la lumière et de créer une sorte de brouillard. Notre modèle multi-échelle de pluie a pour but de prendre en compte ces deux aspects dans le but de proposer une simulation réaliste. L'apport majeur de ce chapitre est de proposer une corrélation entre la densité des gouttes visibles (échelle mésoscopique) et l'atténuation de la visibilité induite par les gouttes plus lointaines et plus petites (échelle macroscopique).

Les papiers les plus récents [12] et [15] utilisent un système de particules et une bibliothèque de textures pour le rendu des cordes. La base de données occupe néanmoins une grande place en mémoire et un système de particules nécessite une implémentation spécifique de façon à préserver une distribution cohérence des gouttes dans l'espace au cours du temps. Une autre difficulté réside dans le fait de ne prendre en compte que les gouttes réellement visibles à l'écran une fois les calculs de projection effectués. Une autre technique de rendu [51] consiste à utiliser une ou plusieurs textures de pluie positionnées à différentes distances de l'observateur. Ces textures ont généralement une taille finie pouvant ainsi entraîner des répétitions de motifs lors de l'animation. De plus, le seul moyen de modifier en temps réel l'intensité des précipitations est d'utiliser différentes textures. Toutes ces méthodes sont généralement couplées avec un modèle de brouillard indépendant, de façon à simuler l'atténuation de la visibilité rencontrée dans les scènes de pluie. Cette indépendance pose justement problème ; la plupart de ces méthodes ne proposent pas de corrélation entre la densité des cordes visibles au premier plan et la dégradation de la visibilité en arrière plan.

## 3.2 Synthèse de l'existant

Nous nous appuyons dans cette section sur l'état de l'art des méthodes de rendu de pluie présenté dans le chapitre 1. Plus spécifiquement, nous nous focalisons sur les méthodes de génération des cordes et sur l'atténuation de la visibilité car il s'agit des deux éléments clés de notre modèle multi-échelle.

### 3.2.1 Le rendu des cordes

Nous pouvons classifier les papiers en deux catégories : les papiers utilisant des textures discrètes et finies de pluie et ceux utilisant un système de particules.

Les papiers [54] et [51] appartiennent à la première catégorie. Ces méthodes présentent deux avantages certains : la simplicité d'implémentation et le faible coût en temps de calcul. Néanmoins, on retrouve principalement deux problèmes récurrents. Les textures de pluie étant finies, des répétitions de motifs peuvent apparaître pendant l'animation et peuvent ainsi empêcher la simulation d'être visuellement réaliste. De plus, si ces textures sont générées selon un processus artistique, il en résultera une distribution empirique non réaliste des gouttes. Le second problème majeur réside dans l'incapacité à changer dynamiquement l'intensité des précipitations pendant la simulation. De plus, les cordes représentées n'ayant aucune réelle existence dans la scène, il devient impossible de gérer des collisions avec l'environnement.

Les papiers [15], [53], [45], [50], [40] et [41] et [12] proposent quant à eux un rendu des cordes basé sur un système de particules. Ces méthodes sont généralement plus coûteuses en temps de calcul. De manière générale, soit des motifs de corde sont extraits à partir d'une vidéo et sont ensuite appliqués sur les particules, soit des motifs pré-calculés sont utilisés. À ce propos, Garg and Nayar [15] sont les premiers à proposer une bibliothèque de cordes. Leur méthode a été réutilisée par Tariq [50] et plus récemment par Creus et Patow [12], offrant par ailleurs des résultats visuellement très convaincants. Leurs textures sont classifiées en fonction de trois angles dépendants de la position de l'observateur et des sources de lumière, ces dernières étant prises en compte dans le processus de rendu des cordes. Les rendus proposés sont encore une fois très convaincants et permettent d'atteindre un haut niveau de réalisme. Le principal inconvénient de cette méthode concerne l'empreinte mémoire de la bibliothèque puisqu'elle occupe à elle seule plusieurs centaines de Mo. De plus, elle nécessite l'implémentation d'un système de particules pouvant coûter beaucoup de ressources GPU, système par ailleurs basé *vertex* pouvant être problématique dans les scènes où la complexité géométrique est déjà élevée. De plus, la génération et la gestion des particules uniquement dans le champ de vision n'est pas un problème trivial. Il peut s'avérer compliqué de maintenir une distribution constante et correcte des gouttes dans l'espace tout en évitant des répétitions de motifs.

La régénération des particules au moment de leur mort doit permettre de conserver une certaine distribution statistique, nécessitant donc une attention tout particulière à l'implémentation.

### 3.2.2 L'atténuation de la visibilité

La plupart des méthodes de rendu de pluie ont une approche totalement empirique en ce qui concerne l'atténuation de la visibilité. Elles utilisent généralement un brouillard dont la densité est laissée à l'appréciation de l'utilisateur. Cela conduit à obtenir une simulation dans laquelle la densité des gouttes n'est pas corrélée avec la perte de visibilité constatée. Tatarchuk et Isodoro [51] ainsi que Tariq [50] proposent de simuler cette atténuation sans pour autant donner une valeur précise pour le coefficient d'extinction, coefficient traduisant l'atténuation de la visibilité induite par l'ensemble des gouttes d'eau présentes dans l'environnement, et devant être nécessairement corrélé avec l'intensité des précipitations et la distribution des gouttes. Changbo et al [9] proposent quant à eux la possibilité de simuler cette atténuation en prenant en compte différentes tailles de gouttes. Il est néanmoins assez difficile de savoir dans leur méthode quelles données doivent être pré-calculées et comment la méthode se doit d'être implémentée. Ils n'expliquent pas non plus comment fixer la valeur du coefficient d'extinction.

Une approche différente et originale a été proposée par Langer et al [30] pour le rendu de neige et de pluie. Leur méthode repose sur l'évaluation d'une fonction de densité dans le domaine spectral, nécessitant de passer en permanence du domaine spatial au domaine spectral en utilisant la Transformée de Fourier et son inverse. Ces chercheurs ont en effet clairement noté dans leur papier qu'il est inutile d'augmenter le nombre de particules visibles car cela ne permet en rien de ressentir visuellement la densité du phénomène simulée. Il est préférable de ne simuler que les flocons/gouttes réellement visibles au premier plan et contribuant à voir le phénomène à une plus petite échelle, tout en utilisant une méthode de rendu plus globale afin de simuler la perturbation de la visibilité dans la scène induite par les flocons/gouttes en suspension. Le risque étant que l'augmentation significative du nombre de particules peut également générer certains artefacts visuels.

Les méthodes présentées ci-dessus parviennent donc à simuler cette atténuation en ayant systématiquement une approche macroscopique. Cependant, elles ne prennent pas en compte la distribution des gouttes dans la scène ni l'intensité des précipitations, de façon à corréliser le phénomène d'atténuation avec la densité des cordes visibles. Les méthodes basées sur les textures de pluie parviennent quant à elles à gérer uniquement ce qui est visible par la caméra ce qui n'est pas nécessairement le cas des méthodes basées sur les systèmes de particules. En revanche, cela vient au détriment de la possibilité de contrôler la simulation en temps réel.

### 3.3 Apports

Avant de présenter notre méthode de rendu dans la section suivante, nous décrivons succinctement ci-dessous les principales contributions de notre approche multi-échelle :

- une génération procédurale des cordes basée sur la théorie du *sparse convolution* afin de représenter les cordes visibles au premier plan. Il s'agit d'une méthode hybride à mi-chemin entre le principe des textures de pluie et un système de particules. Ce type de méthodes procédurales est largement utilisé en informatique graphique afin de créer généralement en temps réel des textures complexes présentant des propriétés stochastiques stationnaires. Le fait que la texture soit évaluée au vol de façon procédurale nous garantit le maintien du contrôle sur la densité des cordes représentées.
- une fonction de densité permettant de quantifier le nombre de cordes visibles au premier plan selon l'intensité de la pluie et les paramètres de la caméra. Cette densité fournit une information cruciale lors de la génération de la texture procédurale. Nous pouvons ainsi savoir à tout instant combien de cordes doivent être représentées à l'écran et ce même si l'intensité des précipitations varie au cours de la simulation. Nous représentons ainsi uniquement ce qui est visible et évitons les calculs inutiles pour les gouttes trop petites et/ou trop éloignées de la caméra.
- un modèle multi-échelle permettant de corrélérer l'atténuation de la visibilité et la densité des cordes visibles en fonction de l'intensité des précipitations, et selon une distribution identique des tailles de gouttes. Le rendu de la dégradation optique est évalué avec une méthode basée sur une diffusion simple de la lumière, de façon à limiter les temps de calcul tout en garantissant un rendu réaliste et une implémentation facile dans n'importe quel moteur de jeu actuel.

## 3.4 Modèle multi-échelle de pluie en temps réel

En nous basant sur les observations de l'étude physique dans le chapitre précédent, nous allons proposer une méthode de rendu de pluie intégrant un modèle de rendu pour les cordes visibles au premier plan et un modèle pour le rendu de la dispersion de la lumière dans la scène.

A l'échelle mésoscopique, nous proposons une méthode de génération des cordes prenant en compte les problèmes inhérents au système de particules et aux textures de pluie. Au delà d'une certaine distance, les gouttes ne sont pas visibles individuellement ; cela nécessiterait une précision au sous-pixel et cela reviendrait également à simuler un très grand nombre de gouttes. L'idée est donc de développer une méthode permettant de simuler l'ensemble des gouttes présentes dans la scène en reproduisant la dégradation optique induite par la pluie. Nous allons décrire les deux modèles permettant de représenter les deux échelles de visibilité, ainsi que les paramètres nous permettant de contrôler notre simulation de pluie en temps réel.

### 3.4.1 Échelle mésoscopique : rendu des cordes

Nous avons mis en évidence les problèmes récurrents rencontrés avec les méthodes basées sur un système de particules et sur des textures de pluie. Le système de particules offre la possibilité de contrôler précisément chacune des gouttes mais nécessite une implémentation spécifique et complexe si l'on souhaite gérer exclusivement les particules visibles. Certaines gouttes sont visibles par la caméra une fois les calculs de projection effectués, et d'autres ne le seront pas selon leur taille et leur éloignement de l'observateur. La complexité réside également dans le fait de conserver à n'importe quel instant  $t$  une distribution cohérente des gouttes. De plus, ce type de méthodes se base généralement sur l'utilisation d'une bibliothèque de textures nécessitant une occupation mémoire importante. Les méthodes basées sur les textures de pluie nécessitent quant à elles très peu de calculs mais sont généralement limitées en nombre. Une texture va être créée pour chaque intensité de pluie que l'on va vouloir simuler empêchant ainsi d'avoir un contrôle précis sur la simulation. De plus, les textures étant finies, des répétitions de motifs peuvent apparaître lors de l'animation.

Pour résoudre ces problèmes, nous proposons une méthode hybride combinant à la fois le principe des systèmes de particules et des textures de pluie. Notre génération de cordes est contrôlée grâce à une fonction de densité évaluée au vol selon l'intensité des précipitations et les paramètres de la caméra. De plus, notre méthode permet de ne gérer que les cordes visibles par la caméra.

Considérons la pluie comme étant simplement un ensemble de gouttes distribuées dans l'espace. La taille de chacune des gouttes varie. De plus, elles se recouvrent et se

superposent à l'écran une fois les calculs de projection effectués. Nous pouvons ainsi considérer la couleur d'un pixel comme étant la contribution des différentes gouttes projetées superposées les unes sur les autres. Les méthodes à base de *sparse convolution* [32] ont été très largement utilisées en synthèse d'images pour reproduire du contenu non répétitif sur des surfaces infinies. Ces techniques permettent d'avoir une représentation infinie de différents phénomènes tout en étant évaluée en temps réel, et cela à n'importe quelle échelle. Ce type de méthodes consiste à effectuer un échantillonnage uniforme du domaine spatial et à associer un ou plusieurs noyaux à chaque échantillon. Chaque point du domaine spatial peut être évalué comme étant la somme des contributions de tous les noyaux distribués. Le *sparse convolution noise* utilise généralement une distribution de Poisson [10]. Comme cela a été récemment expliqué par Gilet et al [17], des méthodes de distribution simplifiées telles que l'utilisation d'une grille régulière peuvent être utilisées en conjonction avec différents types de noyaux. Cela permet d'avoir notamment un contrôle précis sur le signal généré.

Notre objectif est de disposer d'une texture procédurale de pluie contrôlable en temps réel. Nous proposons de considérer cette texture comme étant une convolution de noyaux de corde distribués sur une grille échantillonnée de façon régulière. De plus, pour éviter les problèmes de mémoire induits par les bibliothèques de textures, nous proposons également d'exprimer les noyaux de corde comme une somme de sinusoides dont les fréquences seront extraites à partir de véritables images de corde. Ces calculs sont effectués en utilisant la théorie de Fourier. Cette théorie explique que n'importe quel signal peut être décomposé puis reproduit en additionnant toutes les composantes fréquentielles qui le caractérisent. Un seuillage du spectre de Fourier nous permet néanmoins d'extraire uniquement les fréquences fondamentales (soit les fréquences contenant la majeure partie de l'énergie du signal), et ainsi de reproduire un signal très proche de l'original en utilisant l'équation suivante :

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i \times \cos(2\pi(f_i u \times g_i v) + \phi_i) \quad (3.1)$$

avec  $N$  le nombre de fréquences fondamentales pour reproduire un motif spécifique de corde,

$\alpha$  est l'amplitude,

$\phi$  la phase du couple de fréquences  $f g$ ,

$u v$  sont les coordonnées spatiales dans l'intervalle  $[0 ; 1]$ .

Comme le montre la Figure 3.1, l'utilisation de seulement 6 fréquences peut être suffisante pour reproduire un motif de corde proche de l'original. Cette même figure nous montre également que le signal se détériore en utilisant un nombre moins élevé

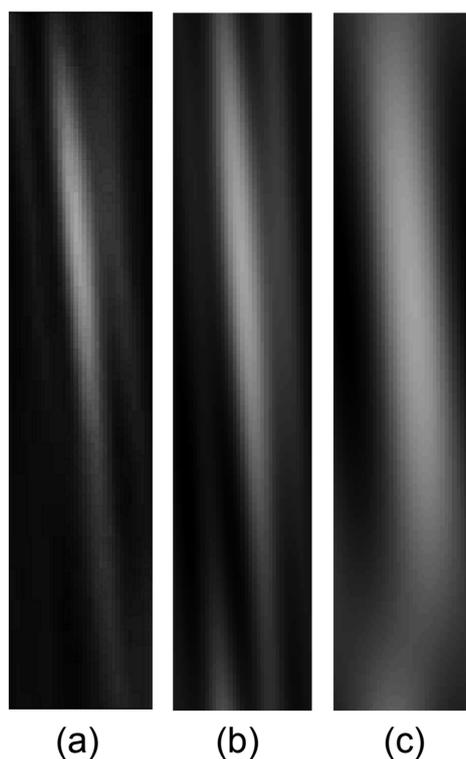


FIGURE 3.1 – (a) Motif de corde original. Reconstruction d’un motif en utilisant (b) 6 fréquences et (c) 3 fréquences.

de fréquences. Nous avons abordé la notion de noyau ainsi que la possibilité d’avoir plusieurs types de noyaux distribués dans l’espace ; du fait de ce que nous venons de voir, un motif particulier de corde sera donc associé à chaque noyau distribué. Barnum et Narasimhan [3] ont également effectué une analyse spatiale et spectrale de la pluie et ont noté que l’apparence d’une corde est proche d’une gaussienne orientée. Représenter une corde de cette façon présenterait un avantage certain en terme de simplicité car l’équation d’une gaussienne orientée est connue et peut être facilement évaluée en temps réel. L’inconvénient de cette représentation résiderait néanmoins dans la répétitivité des motifs. En proposant une distribution basée sur la théorie du *sparse convolution*, nous évitons les répétitions dans la répartition spatiale des cordes et nous ne souhaitons donc pas retrouver des problèmes de répétitions dans le rendu des cordes.

Il nous reste cependant à déterminer la fonction de densité censée nous donner le nombre de noyaux à distribuer sur la grille. La distribution des tailles de gouttes de Marshall et Palmer [34] nous permet d’estimer le nombre de gouttes par volume pour une intensité de pluie donnée et pour un diamètre de gouttes donné, certaines visibles et d’autres non. Nous nous intéressons ici uniquement aux gouttes visibles dont la taille de projection est donc supérieure à un pixel. Comme nous l’avons déjà noté dans le chapitre précédent, deux gouttes de tailles différentes peuvent avoir la même taille de projection selon leur distance par rapport à l’observateur. Nous devons donc disposer de la densité

des cordes pour une taille de projection ou une empreinte  $E$  et pour un diamètre de gouttes  $D$  en fonction des paramètres de la caméra et de l'intensité de la pluie  $\mathcal{I}$ .

Si l'on regarde de plus près les calculs de projection d'une goutte (section 2.2.2), on constate que la taille projetée dépend du champ de vision de la caméra et de la résolution. De plus, un autre paramètre non pris en compte dans les calculs classiques de projection est le temps d'exposition de la caméra. Ce paramètre a pour effet de faire varier la manière dont les cordes seront perçues, et, plus précisément, aura une incidence sur leur hauteur. La prise en compte de tous ces paramètres permet de représenter les gouttes visibles à l'écran. Pour une taille de projection donnée, nous choisissons d'utiliser  $\delta E$  de façon à simuler une partie du cône de vision, comme indiqué dans la Figure 3.2. Nous considérons que les gouttes appartenant à ce volume ont toutes la même taille de projection. En échantillonnant de façon uniforme l'intervalle des tailles de projection et en prenant en compte l'ensemble des tailles de gouttes existantes, nous simulons ainsi l'intégralité des gouttes visibles à l'écran.

Dans la section 2.2.2, nous avons introduit une équation permettant de calculer l'empreinte d'une corde en fonction de la distance  $z$  séparant l'observateur et la goutte. L'équation en question est la suivante :

$$E(D, T, h, f_{ov}, z) = \frac{y(D, T)h}{2z \tan 0.5f_{ov}}, \quad (3.2)$$

avec  $D$  le diamètre de la goutte en  $mm$ ,

$T$  le temps d'exposition en  $ms$ ,

$h$  la résolution de l'écran sur l'axe vertical,

$f_{ov}$  l'angle d'ouverture de la caméra,

$z$  la distance entre la goutte et l'observateur en  $m$ .

La fonction  $y(D, T)$  a été introduite dans la section 2.2.2; elle permet de calculer la taille d'une corde avant projection sur l'écran en fonction du diamètre de la goutte et du temps d'exposition de la caméra.

Nous pouvons reformuler l'équation 3.2 en exprimant la distance  $z$  en fonction des autres paramètres. La Figure 3.2 présente la fonction  $z$  permettant de calculer à quelle distance de l'observateur une goutte doit être positionnée pour avoir une taille de projection  $E$ .

$$z(D, E, f_{ov}, T, h) = \frac{y(D, T)h}{2E \tan 0.5f_{ov}} \quad (3.3)$$

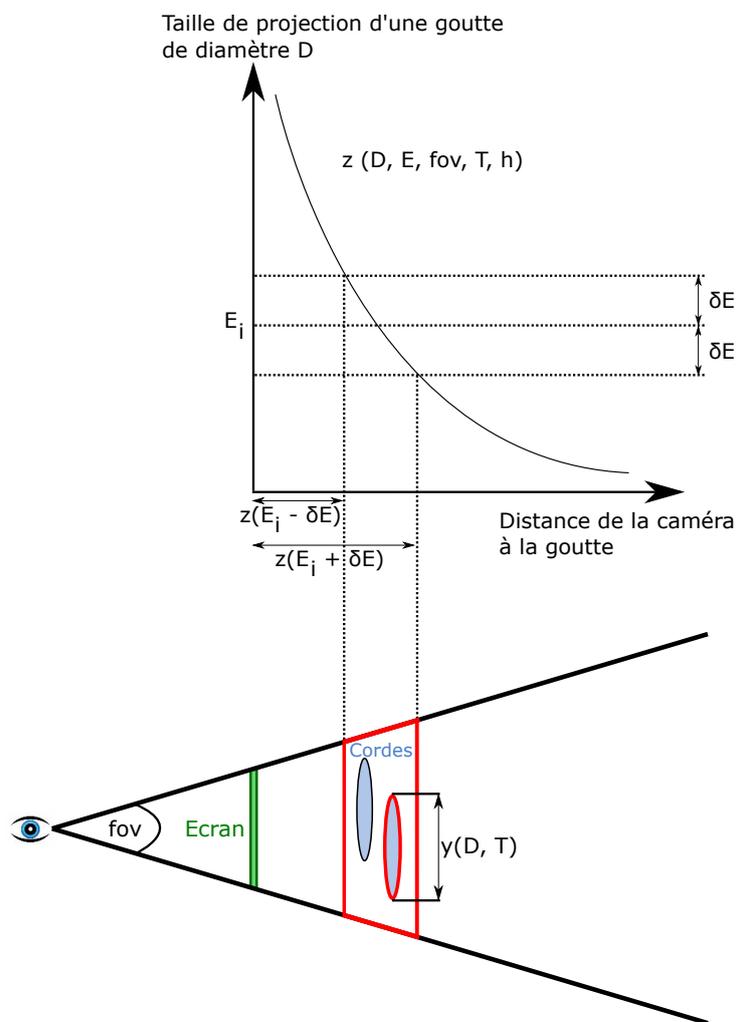


FIGURE 3.2 – Simulation d’une partie du cône de vision pour une taille de projection ou empreinte  $E$  et pour un diamètre de gouttes  $D$ , en fonction des paramètres de la caméra  $f_{ov}$  et  $T$ .

En utilisant l'équation 3.3, un volume spécifique dans le cône de vision peut être calculé (figure 3.2). Nous en déduisons la fonction de densité  $f_d$  :

$$f_d(D, E, \delta E, f_{ov}, T, h, \mathcal{I}) = V(D, E, \delta E, f_{ov}, T, h) \times N(D, \mathcal{I})\delta D \quad (3.4)$$

$N(D, \mathcal{I})\delta D$  correspond au nombre de gouttes par  $m^{-3}$  pour un intervalle de taille  $\delta D$  selon la distribution de Marshall et Palmer [34]; cette relation a été présentée dans la section 2.2.4.  $V(D, \dots, h)$  est quant à elle une fonction permettant de calculer un volume spécifique dans le champ de vision de la caméra en utilisant l'équation 3.3.

L'animation de la pluie est obtenue en effectuant une translation des noyaux. La distribution des noyaux reste ainsi constante durant toute la simulation. La vitesse terminale des gouttes est utilisée pour connaître la vitesse de translation de la texture procédurale pour chaque taille de projection et pour chaque diamètre de gouttes. Nous ne proposons pas de méthode particulière de façon à prendre en compte la réfraction des gouttes. Il est possible de simplement mélanger la texture procédurale avec la scène à l'aide d'un coefficient dont la valeur peut être fixée par l'utilisateur. Ce coefficient a dans ce cas-là pour but de simuler la réfraction de la scène pour chaque corde, et de quelle manière les cordes influencent l'éclairage de la scène.

Il est à noter que notre méthode permet de prendre en compte les lumières de la scène dans le rendu des cordes. Une connaissance de la position et des propriétés de chacune des lumières nous permettrait d'évaluer en temps réel leur influence et contribution à l'apparence des cordes. Pour cela, la fonction de phase de Henyey-Greenstein, abordée dans la sous-section suivante, pourrait être utilisée pour savoir la quantité de lumière renvoyée vers la caméra pour chaque corde et cela pour chaque source lumineuse de la scène, et ceci sans un surcoût excessif dès lors que l'on ne teste pas systématiquement toutes les lumières de la scène.

### 3.4.2 Échelle macroscopique : rendu de la dégradation optique

Nous venons de décrire notre méthode de génération de cordes prenant exclusivement en compte les gouttes visibles par la caméra. Nous allons maintenant voir comment simuler indirectement les gouttes plus lointaines ou plus petites non visibles individuellement, mais contribuant tout de même à l'ambiance pluvieuse de la scène. Ces dernières forment ce que l'on appelle un milieu participant dans lequel un certain nombre d'interactions lumière/particule vont avoir lieu. Il en résulte une sorte de brouillard venant altérer la visibilité. La présence des gouttes a pour effet de perturber la trajectoire incidente de la lumière et entraîne ce phénomène d'atténuation de la visibilité. Nous allons décrire plus spécifiquement le comportement de la lumière au contact des gouttes dans l'air. Nous

allons également introduire une méthode de rendu basée sur une diffusion simple de la lumière de façon à éviter un coût de calcul trop élevé. La méthode permet de simuler l'atténuation de la visibilité par temps pluvieux, et est basée sur la même distribution de gouttes que celle utilisée pour la fonction de densité lors de la génération des cordes.

Nous avons vu dans le chapitre précédent que le coefficient d'extinction peut être calculé en fonction de l'intensité des précipitations [2] à partir de la distribution des gouttes de Marshall et Palmer [34]. La fonction de densité que nous avons précédemment introduite pour évaluer la génération des cordes dépend de la même distribution de gouttes, permettant ainsi une corrélation entre la région des cordes visibles et le phénomène de diffusion de lumière. Le coefficient d'extinction dépend souvent des longueurs d'onde visibles. Les gouttes d'eau étant largement plus grosses que les longueurs d'onde, nous considérons que le coefficient d'extinction est le même pour chacune d'entre elles.

Hoffman et Preetham [19] ainsi que Cozman et Krotkov [11] calculent la transmittance du milieu de façon à simuler le phénomène d'extinction en considérant que le milieu en question est homogène et est composé d'un seul type de particules. Nous allons utiliser la même notation que Hoffman et Preetham en renommant la transmittance en fonction d'extinction ou  $F_{ext}$ .

$$F^{ext}(d) = \exp(-\beta^e d) \quad (3.5)$$

avec  $d$  la distance entre l'objet et l'observateur,

$\beta^e$  le coefficient d'extinction du milieu.

Nous avons évoqué la fonction de phase de Henyey-Greenstein reposant sur la théorie de Mie, théorie permettant la représentation mathématique des contacts entre la lumière et les particules de taille importante. La diffusion de Rayleigh quant à elle a pour but de prendre en compte les particules beaucoup plus petites telles que les particules d'air. Des coefficients Rayleigh peuvent être calculés au même titre que notre coefficient d'extinction afin de représenter la diffusion et l'absorption induite par les petites particules. Néanmoins les coefficients de Rayleigh s'avérant être infimes comparativement au coefficient d'extinction de la pluie, nous considérons qu'il est inutile de les prendre en compte car ils ne participeront en rien à l'atmosphère pluvieuse de la scène. Hoffman et Preetham considèrent que le différentiel de lumière entrante  $dL^{ent}$  sur un pas infinitésimal  $dx$  provient uniquement de la lumière directe du soleil. Ils considèrent également que la lumière n'effectue qu'un seul rebond avant de parvenir à l'observateur.

Nous obtenons ainsi l'équation différentielle suivante :

$$dL^{ent} = L^{sol} \beta^d \mathcal{P}_M(\theta) dx \quad (3.6)$$

avec  $L^{sol}$  la radiance du soleil,

$\beta^d$  le coefficient de diffusion sortante,

$\mathcal{P}_M$  la fonction de phase.

La lumière entrante sur un pas  $dx$  va également subir une atténuation sur cette même distance avant d'atteindre notre œil. Nous complétons l'équation différentielle précédente pour obtenir l'équation suivante :

$$dL^{ent} = L^{sol} \beta^d \mathcal{P}_M(\theta) dx - L^{ent} \beta^e dx \quad (3.7)$$

avec  $\beta^e$  le coefficient d'extinction.

Cette équation différentielle est de la forme  $y' = ay + b$  avec  $y' = \frac{dy}{dx}$ . Il s'agit d'une équation différentielle avec second membre et à coefficients constants. Elle se résout comme suit :

$$L^{ent} = K \exp(-\beta^e x) + \frac{L^{sol} \beta^d \mathcal{P}_M(\theta)}{\beta^e} \quad (3.8)$$

On définit  $K$  à partir de la condition initiale  $L^{ent}(0) = 0$ .

$$K = -\frac{L^{sol} \beta^d \mathcal{P}_M(\theta)}{\beta^e} \quad (3.9)$$

L'équation 3.8 se réécrit comme suit :

$$L^{ent}(x) = \frac{L^{sol} \beta^d \mathcal{P}_M(\theta)}{\beta^e} [1 - \exp(-\beta^e x)] \quad (3.10)$$

Si nous considérons que la part de l'absorption est quasiment nulle dans le cas de la pluie, l'équation se simplifie ainsi :

$$L^{ent}(x) = L^{sol} \mathcal{P}_M(\theta) [1 - \exp(-\beta^e x)] \quad (3.11)$$

L'équation finale traduisant la dégradation optique par temps de pluie peut être résumée ainsi :

$$L(d, \theta) = L_0 F^{ext}(d) + L^{ent}(d, \theta) \quad (3.12)$$

Comme dans l'équation de transfert de la lumière, nous retrouvons les deux termes correspondants à la lumière atténuée provenant de l'objet visible et à la lumière entrante

le long du rayon de vue. Cette fonction n'est pas qu'un simple brouillard appliqué à la scène, uniquement basé sur la distance séparant les objets de l'observateur. Cette équation prend en compte la source lumineuse naturelle et le type de particules présentes dans l'environnement afin de décrire la façon dont la lumière est diffusée dans la scène. Il est possible de modifier la simulation en temps réel en jouant sur les paramètres tels que l'irradiance solaire et l'excentricité. De plus, la distribution des tailles de gouttes, calculée à partir d'un unique paramètre d'entrée, l'intensité de la pluie, est utilisée à la fois pour évaluer la densité de cordes visibles à l'écran et pour calculer le coefficient d'extinction. On retrouve ainsi le même paramètre  $\mathcal{I}$  dans la fonction de densité 3.4 et dans l'équation 2.34 permettant de calculer le coefficient d'extinction.

De plus, notre méthode, bien qu'étant en post-traitement et basée en espace écran, permet de prendre en compte les éléments occultants et les espaces couverts. Nous pouvons retrouver la position dans l'espace monde de chaque corde générée et cela pour chaque taille de projection et pour chaque taille de gouttes. Cela nous permet donc d'avoir une information de profondeur lors de la génération de la texture procédurale de façon à savoir si telle ou telle corde est censée être cachée par un élément occultant potentiel. De plus, nous sommes également capables à partir d'une carte de profondeur de tenir compte des espaces couverts comme l'ont fait Rousseau et al [45]. Cette carte peut être obtenue grâce à une seconde caméra capturant la scène vue de dessus. Il s'agit en réalité d'un problème classique de visibilité comme celui que l'on rencontre dans le cas des cartes d'ombres.

## 3.5 Implémentation

Nous expliquons dans cette section notre implémentation CPU et GPU pour le rendu des cordes et l'atténuation de la visibilité. L'utilisateur a la possibilité de modifier la simulation en temps réel en faisant varier différents paramètres : l'intensité de la pluie  $\mathcal{I}$  ainsi que le champ de vision  $fov$  et le temps d'exposition  $T$  de la caméra.

### 3.5.1 CPU

Tous les calculs suivants sont faits côté CPU avant le début de la simulation. Certaines données ont besoin d'être recalculées selon le paramètre qui change. Les cordes étudiées proviennent d'une vidéo de pluie. L'amplitude et la phase des fréquences fondamentales sont extraites en utilisant la Transformée de Fourier pour chaque motif de corde. Toutes ces données sont ensuite envoyées au GPU pour la passe de rendu. La fonction de densité pré-calculé le nombre de cordes à représenter pour différentes tailles de projection et pour chaque taille de gouttes en fonction de l'intensité des précipitations et des paramètres de la caméra.

### 3.5.2 GPU

Une seule passe GPU est utilisée pour la génération des cordes et pour l'atténuation de la visibilité. La génération procédurale de cordes crée une texture de pluie infinie à partir de la bibliothèque de fréquences. Chaque motif est reproduit en sommant une sinusoïde pour chaque couple de fréquences  $f_u f_v$ . L'espace écran est échantillonné selon une grille régulière de façon à ne pas évaluer la contribution des noyaux trop éloignés. Chaque cellule de la grille dispose d'un indice unique déterminé à partir des coordonnées de texture. Le générateur de nombre aléatoire permet de toujours retrouver la même suite de valeurs aléatoires pour une cellule donnée, et donc nous permet de conserver une cohérence temporelle d'une image sur l'autre pour l'animation et le rendu des cordes. Le rendu de la dégradation optique consiste quant à lui à évaluer l'équation 3.12 pour chaque fragment.

### 3.6 Résultats

Les résultats sont présentés Figure 3.3 et 3.4. Plus l'intensité des précipitations augmente, plus la visibilité se dégrade dans la scène et plus le nombre de cordes visibles au premier plan augmente. Les deux échelles de visibilité sont corrélées au travers d'une distribution identique des tailles de gouttes.



FIGURE 3.3 – Rendu d'une pluie faible



FIGURE 3.4 – Rendu d'une pluie forte

Les résultats sont obtenus sur une Nvidia Geforce GTX 980 en utilisant le moteur d'Unreal Engine 4. Les temps de calcul concernant l'atténuation de la visibilité ne varient pas ; ils sont indépendants de la complexité de la scène et des autres paramètres. La scène originale tourne à 60 IPS et à 50 IPS avec le rendu de la pluie. Le nombre d'IPS ne varie quasiment pas lorsque l'on fait varier l'intensité des précipitations, que ce soit pour une pluie faible ou une pluie très forte. Les résultats et les performances ont été obtenus en utilisant un temps d'exposition  $T$  fixé à 20  $ms$  et un angle d'ouverture  $f_{ov}$  à 90 degrés.

La Figure 3.5 présente des exemples de textures procédurales que nous avons réalisées selon notre processus de génération.

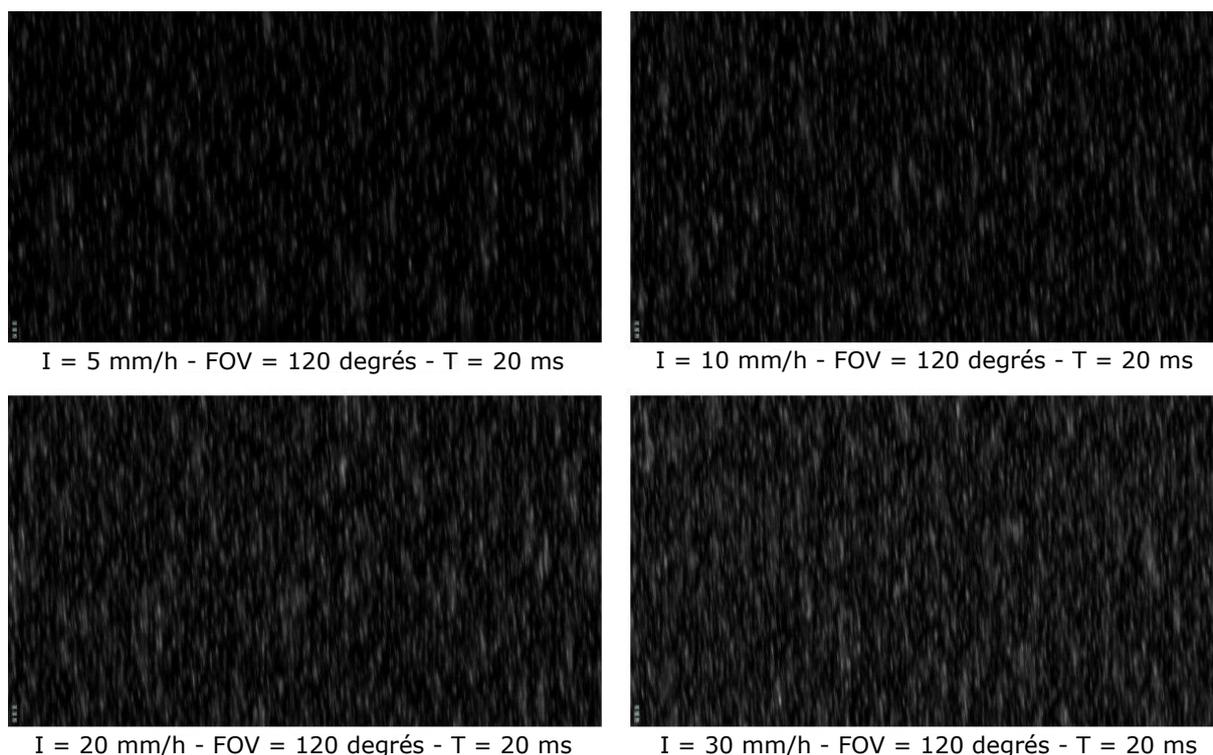


FIGURE 3.5 – Génération procédurale des cordes en faisant varier l'intensité de la pluie.

Concernant la génération des cordes, nous avons opté pour une approche phénoménologique afin de déterminer les tailles de projection à représenter. Nous avons choisi de représenter les cordes dont la hauteur est comprise entre 30 et 130 pixels. L'utilisateur est libre de représenter d'autres tailles de projection. Concernant les cordes inférieures à 30 pixels, nous considérons qu'elles seront indirectement rendues par l'atténuation de la visibilité.

La génération procédurale de cordes (Figure 3.5) permet d'avoir une texture infinie sans répétition et la fonction de densité offre un contrôle précis sur la densité des gouttes à représenter en temps réel. L'empreinte mémoire de notre bibliothèque de fréquences dépend du nombre de motifs extraits et du nombre de fréquences fondamentales. Nous

n'avons pas précisément défini combien de motifs doivent être extraits pour parvenir à un bon niveau de réalisme. En pratique, nous avons observé par une approche empirique qu'une douzaine de motifs de cordes est suffisante pour obtenir des résultats visuellement convaincants. Si l'on considère une douzaine de motifs, chacun d'entre eux ayant en moyenne 6 couples de fréquences avec amplitude et phase, l'empreinte mémoire est autour de 1 ko.

L'avantage majeur de notre méthode est que seules les gouttes réellement visibles par la caméra sont prises en compte ; il s'agit d'une qualité intrinsèque de notre modèle de génération. De même, notre méthode permet de garantir une distribution cohérente des gouttes dans l'espace tout au long de la simulation. Un résultat similaire n'est pas trivial à obtenir avec un système de particules et nécessite par conséquent une implémentation bien spécifique. Contrairement à un système de particules, nous ne sommes pas directement dépendants du nombre de particules à afficher. Contrairement aux méthodes basées *vertex*, nous ne sommes pas limités en nombre de particules. Notre coût en temps de calcul est défini par pixel en fonction du nombre de cordes que nous voulons afficher. De plus, nous proposons une méthode en post-traitement avec tous les avantages que cela entraîne. Beaucoup de simulations temps-réel comme les jeux vidéos utilisent massivement les systèmes de particules pour reproduire certains effets. Notre méthode a l'avantage de proposer une alternative basée calculs pour le rendu des cordes et de l'atténuation de la visibilité. Nous avons également montré que notre méthode de génération des cordes, bien qu'étant basée dans l'espace écran, permet en l'état de prendre en compte les éléments occultants et les espaces couverts comme le permettent les systèmes de particules. Nous conservons ainsi l'avantage inhérent aux systèmes de particules tout en apportant une solution aux limitations des méthodes classiques basées sur des textures de pluie.

## Deuxième partie

# Rendu des interactions avec l'environnement naturel

## Introduction

Nous présentons dans cette seconde partie du mémoire notre méthode de rendu des égouttements provenant de l'environnement naturel, selon une approche fonctionnelle en temps réel. Cette seconde partie se décompose comme suit :

- Le chapitre 4 présente un état de l'art concernant les interactions entre les gouttes et l'environnement de façon à étudier ce que les auteurs proposent dans la littérature scientifique pour solutionner ce problème.
- Le chapitre 5 présente une étude hydrologique sur les égouttements provenant des arbres. Cette étude permet à la fois de présenter les travaux effectués depuis de nombreuses années par les chercheurs spécialisés dans l'hydrologie des forêts, et également de comprendre comment le phénomène d'égouttement peut être quantifié en fonction de différents critères.
- Le chapitre 6 introduit notre méthode pour le rendu des égouttements. Notre approche phénoménologique, basée sur l'étude présentée dans le chapitre 5, permet de gérer les égouttements provenant des arbres en temps réel indépendamment de la complexité de la scène. Notre méthode [57] a fait l'objet d'une publication dans le journal *Computer Graphics Forum* et a été présentée à Dublin, Irlande, lors de la conférence *Eurographics Symposium on Rendering (EGSR)* en juin 2016.

## Chapitre 4 :

# État de l'art sur la gestion des interactions entre les gouttes et l'environnement

Nous présentons dans cet état de l'art à la fois les méthodes proposant un rendu des égouttements, et les méthodes gérant le couplage entre les gouttes et l'environnement. Cela va nous permettre de mettre en évidence les manques dans la littérature scientifique concernant ce domaine de recherche, et de proposer dans le dernier chapitre de ce mémoire une méthode efficace et cohérente pour le rendu des égouttements.

## 4.1 Rendu des égouttements

Dans la première partie du mémoire, nous avons effectué un état de l'art des méthodes de rendu de pluie. Il n'est pas nécessaire de les repasser intégralement en revue dans ce chapitre car quasiment aucune de ces méthodes ne gère les égouttements dans la scène. Les méthodes basées sur un système de particules permettent généralement une gestion des collisions en utilisant une carte de hauteur. Cette carte est capturée à partir d'une seconde caméra à projection orthographique positionnée loin au dessus de la scène. Cette technique bien qu'étant simple offre de bons résultats pour peu que la résolution de la carte en question soit suffisante pour gérer précisément les collisions avec l'environnement. Notre modèle de pluie [56], bien qu'étant basé espace écran, utilise lui aussi cette technique pour gérer à la fois les objets occultants et les espaces couverts. Néanmoins, une telle approche ne suffit pas à gérer les égouttements provenant d'objets complexes tels que les arbres. Cela nécessite de résoudre un certain nombre de problèmes comme le calcul de la fréquence d'égouttement et les positions à partir desquelles les gouttes sont libérées. Une seule méthode de rendu de pluie a proposé jusqu'à présent une solution pour parvenir à un rendu des égouttements en temps réel ; il s'agit du papier de Tatarchuk et Isodoro [51].

Ces derniers utilisent un système de particules pour représenter les égouttements provenant des toits. Les auteurs considèrent que les points de régénération des gouttes sont positionnés à la main par l'utilisateur. Il n'y a aucune indication particulière pour choisir leur emplacement. La méthode ne prend donc pas en compte la structure du toit et de la gouttière pour déterminer par où les gouttes devraient tomber. Il n'y a pas non plus d'informations concernant le nombre de points de régénération ni concernant la fréquence d'égouttement. Or cette fréquence devrait être liée d'une quelconque façon avec l'intensité des précipitations. Plus la pluie est forte, plus la fréquence d'égouttement devrait être importante. Le rendu final est malgré tout très convaincant sur la vidéo Toyshop. Néanmoins aucun paramètre ne permet de maîtriser réellement la simulation et de la contrôler en temps réel.



FIGURE 4.1 – Rendu des égouttements de Tatarchuk et Isodoro [51]

## 4.2 Rendu du couplage entre les gouttes et l'environnement

En plus du phénomène d'égouttement, certaines méthodes tentent de coupler les gouttes avec certains objets complexes. Ces méthodes modélisent les gouttes d'eau sur diverses surfaces et prennent généralement en compte les caractéristiques physiques de la surface pour représenter comment les gouttes se déplacent et se déforment. Les calculs étant basés sur des équations physiques, les temps de calcul sont généralement longs et le nombre de gouttes représentées est assez faible.

Yang et al [59] proposent une méthode permettant de construire des arbres selon un modèle hiérarchique afin de contrôler précisément l'influence des gouttes sur chacune des feuilles. Leur méthode basée physique offre des résultats visuellement impressionnants (figure 4.2). Les auteurs gèrent aussi bien les gouttes en équilibre sur les feuilles que le processus d'égouttement lorsque les gouttes sont sur le point de chuter. Leur simulation physique prend également en compte le rebond de la feuille juste après la libération de la goutte. Yang et al ont par la suite cherché à améliorer leur papier. Ils ont proposé à ce titre de nouvelles contributions [60] afin d'améliorer le niveau de détail et l'animation des arbres au contact des gouttes. Leur simulation tourne en moyenne à 6 images par seconde pour 200 gouttes.

Wang et al [52] ont eux aussi travaillé sur le rendu des gouttes en contact avec des surfaces diverses. Ils proposent une méthode basée physique pour représenter l'écoulement des gouttes (figure 4.3). La simulation nécessitait 5 à 8 jours de calcul en 2005 pour



FIGURE 4.2 – Rendu des interactions entre les gouttes et les arbres par Yang et al [59]

parvenir à ce degré de réalisme. Il est certain que l'évolution de la puissance des cartes graphiques permettrait aujourd'hui de diminuer significativement aujourd'hui les temps de calcul. Les gouttes subissent de multiples déformations à la surface des objets et pendant leur chute. Elles peuvent également se séparer pour donner naissance à de plus petites gouttes.

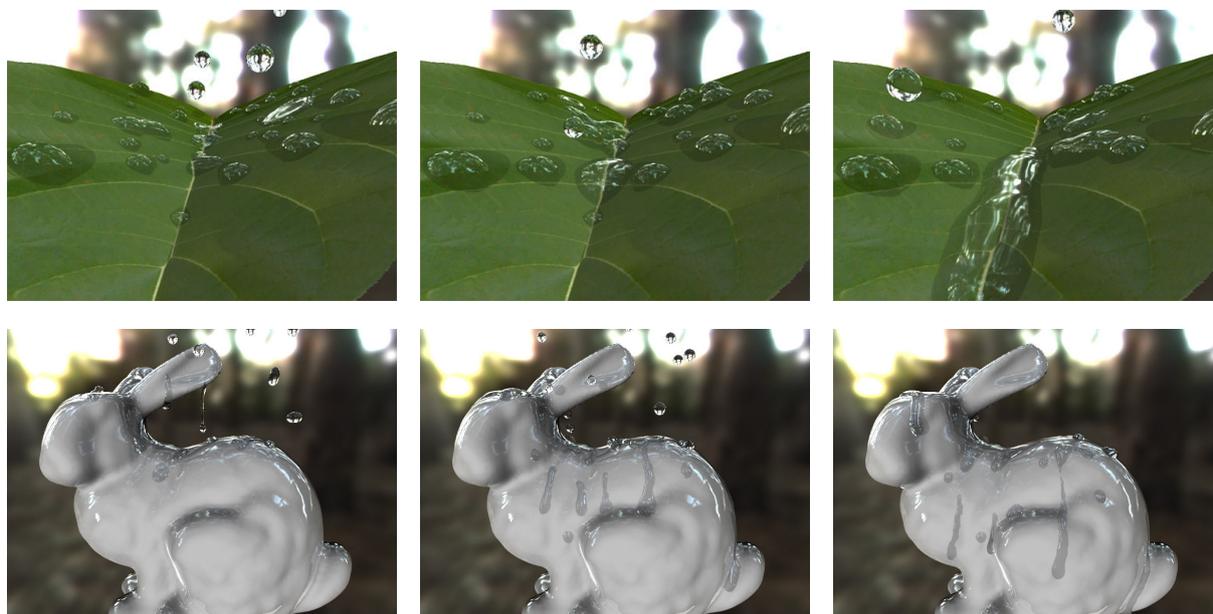


FIGURE 4.3 – Rendu des gouttes en contact avec une feuille et un lapin par Wang et al [52]

Kaneda et al [25] proposent un rendu des gouttes sur des surfaces vitrées. L'une des

applications de la méthode concerne les pare-brises afin de simuler la gêne occasionnée lors de la conduite. La méthode intègre à ce propos la gestion des essuie-glaces dans l'animation et le rendu des gouttes (figure 4.4).

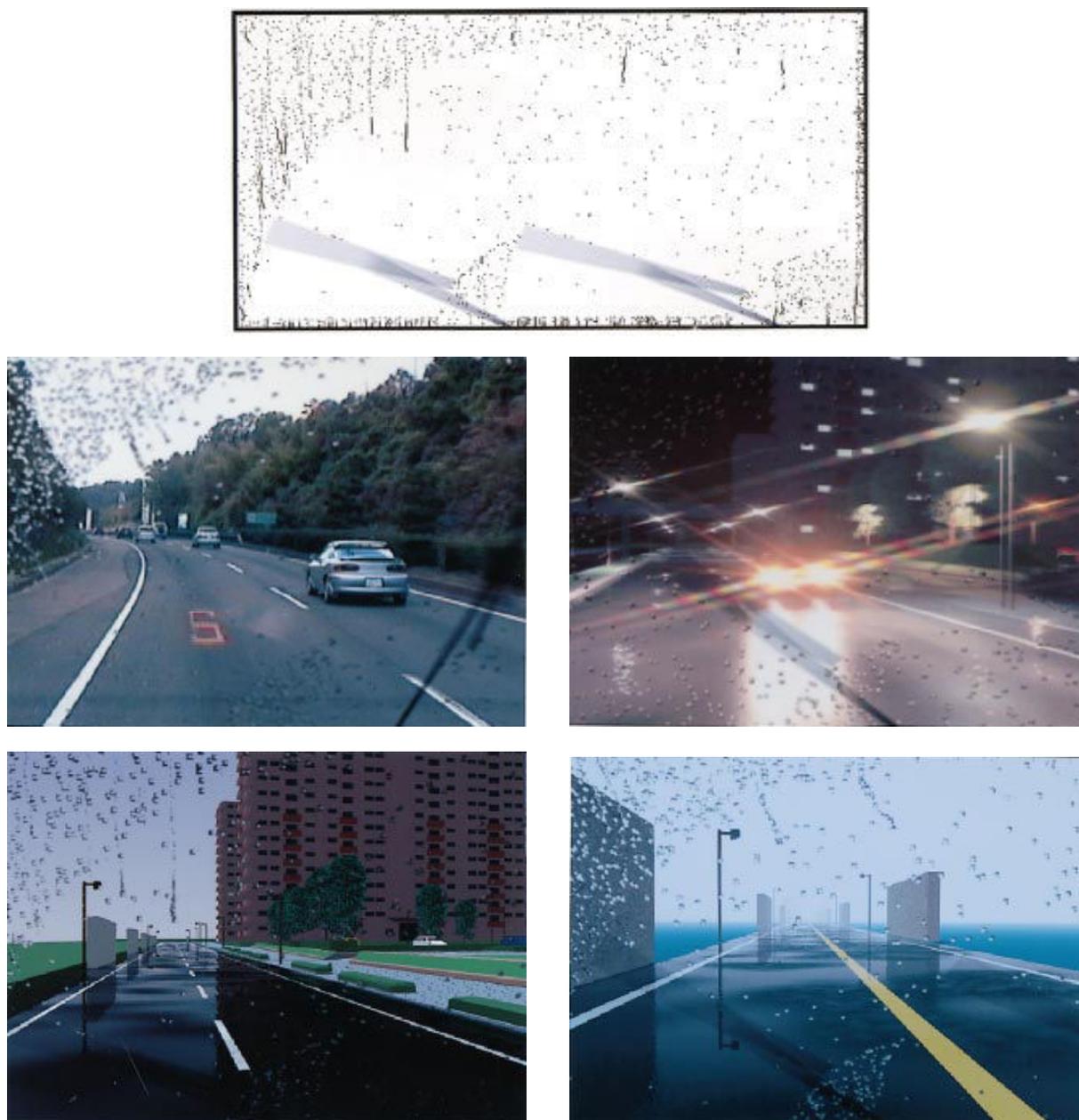


FIGURE 4.4 – Interactions entre les gouttes et les surfaces vitrées par Kaneda et al [25]

Zhang et al [61] présentent quant à eux un rendu des gouttes en tenant compte de leurs déformations en mouvement et au contact avec des surfaces diverses de façon physiquement réaliste et en temps réel. Leur simulation montrant 180 gouttes (figure 4.5) sur des feuilles de lotus tourne à 35 images par seconde.

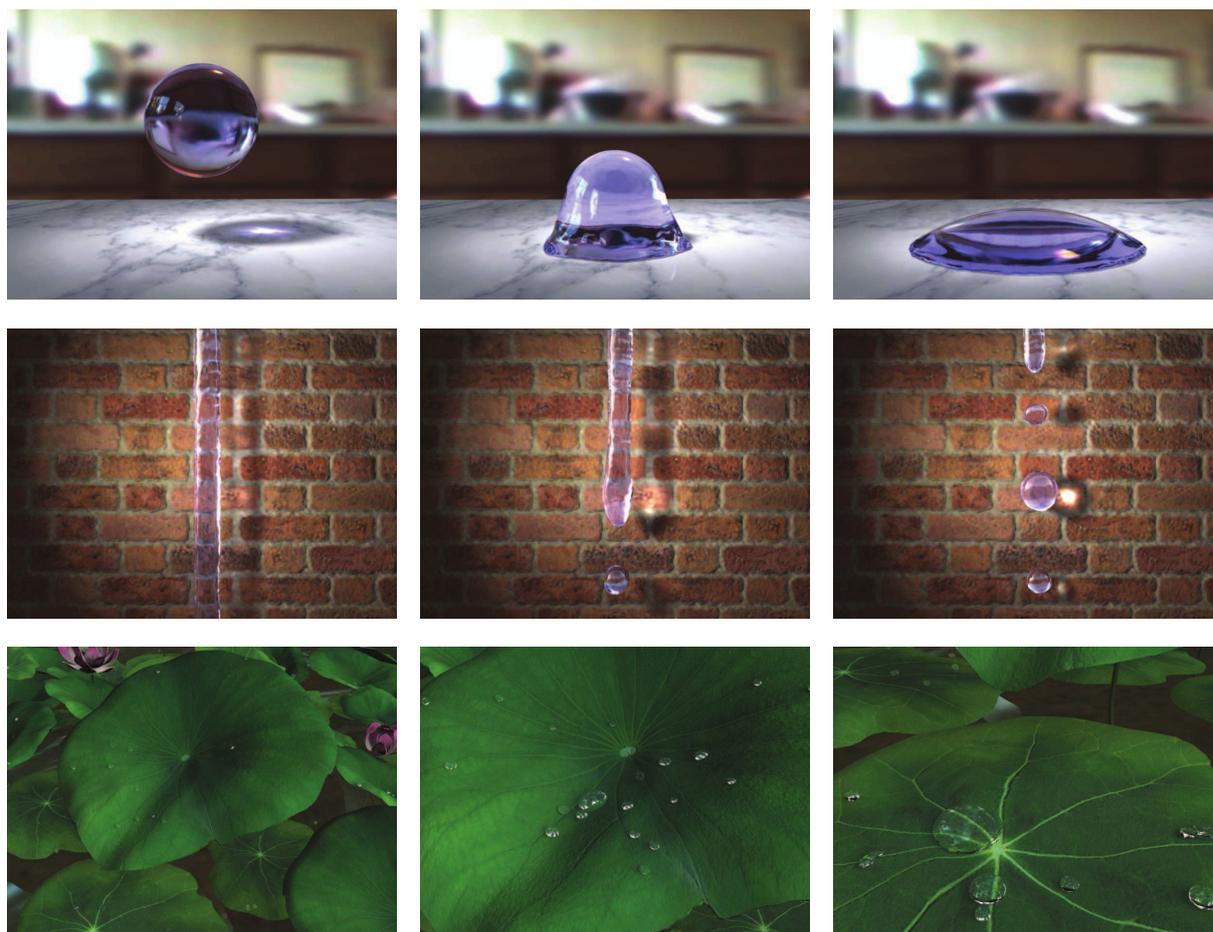


FIGURE 4.5 – Interactions entre les gouttes et différentes surfaces par Zhang et al [61]

## 4.3 Synthèse

Cet état de l'art nous permet de constater un sérieux manque dans la littérature scientifique pour le rendu des égouttements. Une seule méthode de pluie propose jusqu'à présent de tenir compte des égouttements. Cette méthode n'est pour autant pas satisfaisante car elle ne dispose d'aucun paramètre cohérent pour déterminer la position et la fréquence des égouttements. D'autres méthodes tentent de reproduire de façon physiquement réaliste la déformation et l'animation des gouttes en contact avec les objets de l'environnement. Certaines de ces méthodes fonctionnent malgré tout en temps réel, mais le nombre de gouttes représentées reste assez faible, tout particulièrement si l'on souhaite faire un rendu des égouttements dans une scène complexe. Le problème est d'autant plus complexe avec les arbres. Yang et al [59] proposent un rendu visuellement très convaincant des interactions entre les gouttes et les feuilles, mais là aussi le nombre de gouttes représentées est trop faible par rapport à nos exigences. Nous allons dans cette seconde partie du mémoire présenter une méthode physiquement plausible et temps réel pour simuler un grand nombre de gouttes en tenant compte des propriétés intrinsèques des arbres. Cette méthode va s'appuyer sur l'étude hydrologique présentée dans le chapitre suivant.

# Chapitre 5 :

## Étude sur les égouttements provenant des arbres

L'étude présentée dans ce chapitre a pour but de formaliser mathématiquement le processus d'égouttement selon une approche phénoménologique. Nous expliquons tout au long de ce chapitre comment quantifier la distribution des égouttements en fonction des paramètres intrinsèques de chaque modèle d'arbres. Les variations temporelles, spatiales et des tailles de gouttes sont évaluées au travers de 3 ratios déterminant la proportion du volume de pluie régénérée depuis les feuilles. Nous en déduisons une fréquence locale d'égouttement et proposons une formalisation mathématique de façon à représenter les égouttements en tout point de l'arbre.

## 5.1 Modèle hydrologique

Le rendu des égouttements représente un challenge important en informatique graphique, et tout particulièrement dans le cadre de rendu de scènes naturelles réalistes. Une approche basée physique est difficilement envisageable pour du temps réel puisque cela revient à résoudre des équations pour le moins complexes devant prendre en compte les caractéristiques intrinsèques de chaque modèle d'arbres. Une telle solution n'est pas viable à grande échelle lorsqu'il s'agit de gérer un grand nombre d'arbres dans une scène en temps réel. L'objectif de ce chapitre est d'étudier ce phénomène selon une approche phénoménologique afin d'apporter une solution simple mais plausible pour le rendu des égouttements dans le chapitre suivant.

Des chercheurs tels que Nanko et al [37] [36] [35] ont étudié le phénomène d'égouttement provenant des arbres. Ils ont pu observer aussi bien des variations spatiales et temporelles de la quantité d'égouttement que des variations dans la distribution des tailles de gouttes, et cela en fonction de divers paramètres liés à la structure de l'arbre et à son feuillage. L'étude hydrologique présentée dans ce chapitre est le fruit d'une collaboration avec un chercheur spécialisé en hydrologie des forêts, Kazuki Nanko. Ce dernier a accepté de mettre ses relevés à notre disposition afin de nous permettre de comprendre les paramètres ayant une influence sur la distribution des égouttements, et ainsi de construire un modèle hydrologique cohérent.

Dans cette analyse, les arbres sont classifiés en fonction de leur espèce, feuillu ou conifère. D'autres paramètres tels que l'Indice de Surface Foliaire (ISF) et l'épaisseur et l'ouverture de la canopée sont pris en considération. L'ISF est un coefficient sans dimension communément utilisé en hydrologie pour qualifier la densité de la canopée. L'épaisseur de la canopée traduit la distance entre la branche la plus basse et la branche la plus élevée d'un arbre. Enfin, l'ouverture de la canopée correspond à la fraction d'ouverture ou fraction de visibilité du sol au travers de la canopée.

## 5.2 Distribution temporelle

Quand la pluie commence à tomber, l'arbre stocke l'eau sur son feuillage. L'égouttement augmente de façon linéaire au fur et à mesure que le temps passe jusqu'à la saturation notée  $t_{sat}$ . Nous faisons référence à cette période comme étant la phase initiale. Une fois la capacité de stockage de l'arbre atteinte, la quantité d'égouttement se stabilise et devient proche de la quantité de pluie interceptée. Cette période correspond quant à elle à la phase stable. Nous introduisons ici le ratio de distribution temporelle pour les deux phases à partir des observations de Nanko et al [37].

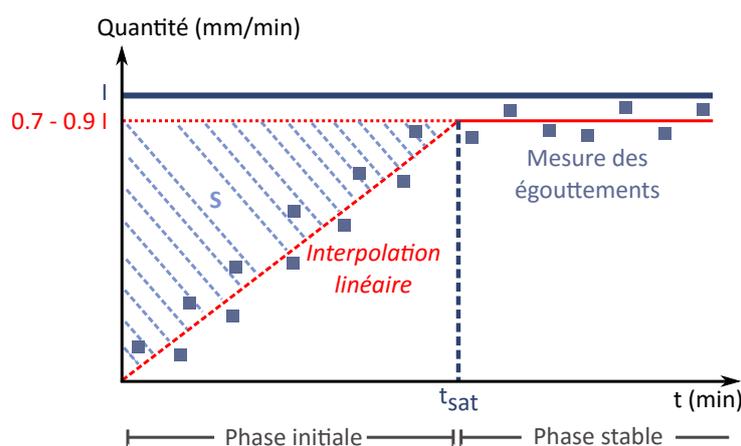


FIGURE 5.1 – Vue schématique de la distribution temporelle des égouttements

Dans la phase stable, les mesures [7] faites montrent qu'une partie de la pluie incidente atteint le sol en s'écoulant le long des branches puis du tronc, ou s'évapore dans l'atmosphère. La proportion de pluie incidente régénérée sous la forme d'égouttement est estimée à 0.7 - 0.9 dans la phase stable. Dans la phase initiale, les expérimentations ont montré que la distribution temporelle dépend de l'espèce de l'arbre et de l'Indice de Surface Foliaire (ISF) noté  $\iota$ . Pour un arbre donné, le point de saturation  $t_{sat}$  est atteint plus ou moins rapidement selon l'intensité de la pluie incidente. La capacité de stockage de l'arbre demeure quant à elle constante pour un arbre donné. Nous proposons de calculer la capacité de stockage  $S$  d'un arbre en utilisant l'équation introduite par Watanabe et Mizutani [55]. Ils distinguent dans leur équation l'espèce de l'arbre, feuillu ou conifère, pour déterminer sa capacité de stockage.

$$S = \begin{cases} 0.15\iota \text{ (mm)}, & \text{pour les feuillus} \\ 0.2\iota \text{ (mm)}, & \text{pour les conifères} \end{cases} \quad (5.1)$$

Nous obtenons ensuite  $t_{sat}$  par une interpolation linéaire.

$$t_{sat} = 7200 \frac{S}{I} \text{ (s)} \quad (5.2)$$

avec  $\mathcal{I}$  l'intensité des précipitations en  $mm.h^{-1}$ .

Le ratio de distribution temporelle  $r_{tp}$  permet d'exprimer le ratio du volume de pluie incidente régénérée au cours du temps pour un arbre donné. Ce ratio se définit comme le rapport du temps  $t$  sur le point de saturation  $t_{sat}$  pour la phase initiale, puis comme une constante pour la phase stable.

$$r_{tp} = \begin{cases} \frac{t}{t_{sat}}, & \text{si } \frac{t}{t_{sat}} < 0.7 - 0.9 \\ 0.7 - 0.9, & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.3)$$

### 5.3 Distribution spatiale

Des études ont été faites pour comprendre la variabilité des égouttements dans l'espace. Les auteurs [37] remarquent une corrélation de la distribution spatiale des égouttements avec la structure de la canopée et la position des branches. Leur expérience met en évidence que la quantité d'égouttement s'accroît à mesure que la distance entre les gouttes et le tronc augmente, à l'exception des égouttements situés au plus proche du tronc. Ceci est dû à la forme conique de l'arbre entraînant des écoulements le long des branches jusqu'au bord de la canopée. Nous considérons qu'il s'agit d'une caractéristique habituelle pour la plupart des arbres. Leur expérience montre également que la structure et l'épaisseur de la canopée jouent un rôle important dans la détermination de la variation spatiale. En élaguant l'arbre, les chercheurs sont capables de souligner l'impact de l'épaisseur de la canopée dans la variabilité spatiale.

Andre et al [1] ont cependant noté qu'aucun consensus n'a été trouvé dans la littérature scientifique accessible concernant la variabilité des égouttements en fonction de la distance entre le tronc et la goutte, que ce soit pour les conifères ou pour les feuillus. Certains auteurs ont reporté des quantités d'égouttement plus importantes à proximité du tronc [14] [18] [43], à la périphérie de la canopée [4] [49] [58] et à une distance intermédiaire [6]. D'autres [27] [33] pensent que la distance entre la goutte et le tronc n'est pas un bon indicateur pour prédire la distribution spatiale. Andre et al observent quant à eux des quantités d'égouttement plus importantes à la périphérie de la canopée pour des pluies faibles et à proximité du tronc pour des pluies plus intenses. Kittredge et al [28] sont eux aussi arrivés à la même conclusion.

Parvenir à observer la pluie en l'absence de vent est très rare en pratique, particulièrement pendant des pluies torrentielles. Kato et al [26] montre une corrélation positive en se basant sur la distance entre le tronc et la goutte en présence de vent faible, mais aucune relation en cas de vent violent. La plupart des précédentes études ont été effectuées en extérieur et beaucoup de facteurs biotiques et abiotiques influencent le processus de distribution des égouttements, donc la distribution spatiale [31]. Nanko et al ont cependant fait leurs expérimentations en intérieur en utilisant un simulateur de pluie et un arbre transplanté dans le but d'éviter les facteurs extérieurs. En conséquence, à l'aide des observations de Nanko et al, nous pouvons approcher le ratio de distribution spatiale  $r_s$  sans facteur externe en fonction de la distance séparant le tronc et la goutte et de l'épaisseur de la canopée. Le ratio est présenté sous la forme d'un tableau à double entrée (tableau 5.1).

Épaisseur canopée	Distance radiale	40	100	150	200
	7,8		0,26	0,18	0,22
6,8		0,24	0,20	0,25	0,31
5,8		0,21	0,19	0,30	0,30
4,8		0,24	0,22	0,28	0,26

Tableau 5.1 – Ratios de distribution spatiale en fonction de l'épaisseur de la canopée et de la distance radiale entre le tronc et la goutte

## 5.4 Distribution des tailles de gouttes

Des expériences [36] ont été conduites pour observer la distribution des tailles de gouttes en fonction de l'espèce de l'arbre. Cette distribution s'avère être clairement dépendante du type de feuilles. Les feuilles de la même espèce génèrent des distributions de tailles de gouttes identiques. Nous proposons ici d'exprimer cette distribution à partir des observations qui ont été effectuées. Les données mesurées sont présentées dans le tableau 5.2.

Diamètre goutte	Médiane	Conifère	Feuillu (mat)	Feuillu (doré)
[ 1.0, 1.5 [	1.25	0	0	0
[ 1.5, 2.0 [	1.75	0.01	0.01	0,01
[ 2.0, 2.5 [	2.25	0.02	0.01	0,02
[ 2.5, 3.0 [	2.75	0.05	0.02	0,04
[ 3.0, 3.5 [	3.25	0.08	0.04	0,07
[ 3.5, 4.0 [	3.75	0.19	0.06	0,17
[ 4.0, 4.5 [	4.25	0.15	0.08	0,37
[ 4.5, 5.0 [	4.75	0.17	0.18	0,28
[ 5.0, 5.5 [	5.25	0.13	0.22	0,04
[ 5.5, 6.0 [	5.75	0.10	0.23	0
[ 6.0, 6.5 [	6.25	0.06	0.12	0
[ 6.5, 7.0 [	6.75	0.03	0.03	0
[ 7.0, 7.5 [	7.25	0.01	0	0
[ 7.5, 8.0 [	7.75	0	0	0

Tableau 5.2 – Ratios moyens de la distribution des tailles de gouttes en fonction de l'espèce de l'arbre

Nous avons ajusté les données de la figure 5.2 en utilisant une méthode de régression basée sur une forme gaussienne. Nous disposons ainsi d'une représentation fonctionnelle suffisamment proche des données d'origine pour la distribution des tailles de gouttes en fonction de l'espèce de l'arbre (figure 5.2).

Le ratio de distribution des tailles de gouttes  $r_{ta}$  peut être exprimé ainsi :

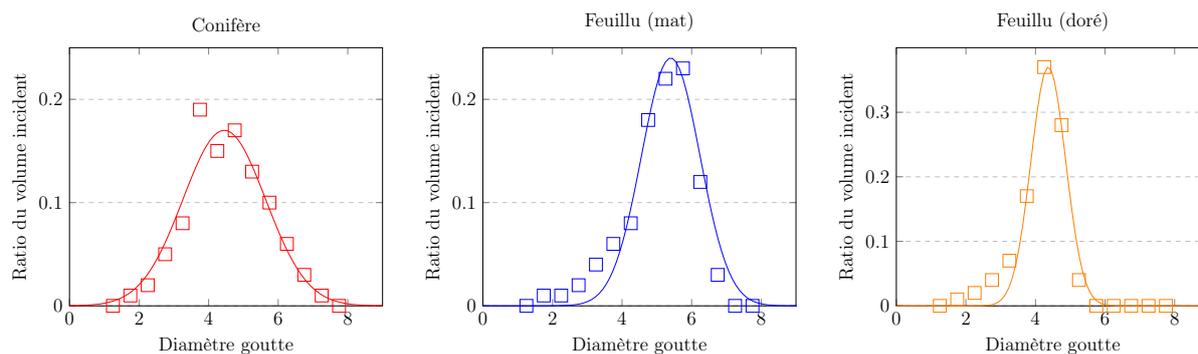


FIGURE 5.2 – Ajustement des distributions des tailles de gouttes selon une forme gaussienne pour chaque espèce d'arbre

$$r_{ta} = a \exp - \frac{(D - b)^2}{2c^2}. \quad (5.4)$$

Les valeurs des coefficients  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont données dans la tableau 5.3.

Espèce	a	b	c
Conifère	0.17	4.45	1.19
Feuillu (mat)	0.24	5.40	0.84
Feuillu (doré)	0.37	4.37	0.50

Tableau 5.3 – Coefficients  $a$ ,  $b$  et  $c$  de l'équation 5.4 en fonction de l'espèce

Les auteurs [37] ont également remarqué une variation spatiale dans la distribution des tailles de gouttes selon la distance radiale entre la goutte et le tronc. Ils ont néanmoins reporté que ces variations doivent probablement venir des gouttes issues d'éclaboussures sur le feuillage. Lorsqu'un égouttement se produit et que la goutte est interceptée par une feuille située en contrebas, une éclaboussure va se produire divisant la goutte en plusieurs gouttelettes. Ce phénomène est dépendant de l'épaisseur de la canopée, cette dernière varie à mesure que l'on s'éloigne du tronc.

## 5.5 Fréquence locale d'égouttement

A partir des distributions temporelles, spatiales et des tailles de gouttes, il nous est possible de déterminer un volume d'égouttement à un instant donné, à une certaine distance du tronc et pour une taille de gouttes donnée. Nous introduisons donc le débit ou flux volumique  $D_v$  correspondant à un volume d'eau par unité de temps.

$$D_v = \frac{\mathcal{I}A r_{tp} r_s r_{ta}}{36 \times 10^5} \quad (m^3.s^{-1}), \quad (5.5)$$

avec  $\mathcal{I}$  l'intensité de la pluie en  $mm.h^{-1}$ ,

$A$  la surface interceptrice de l'arbre en  $m^2$ ,

$r_{tp}$ ,  $r_s$  et  $r_{ta}$  sont respectivement les ratios de distributions temporelle, spatiale et des tailles de gouttes.

Nous convertissons ensuite le débit  $D_v$  en fréquence  $f$  (nombre de gouttes par seconde) à partir l'équation du volume d'une sphère. Les gouttes sont considérées ici comme étant parfaitement sphériques afin de faciliter les calculs.

$$f = \frac{\mathcal{I}A r_{tp} r_s r_{ta}}{6 \times 10^{-4} \pi D^3} \quad (s^{-1}), \quad (5.6)$$

avec  $D$  le diamètre de la goutte en  $mm$ .

Nous en déduisons la période  $T$  correspondant au temps écoulé entre deux égouttements.

$$T = \frac{1}{f} = 6 \times 10^{-4} \frac{\pi D^3}{\mathcal{I}A r_{tp} r_s r_{ta}} \quad (s). \quad (5.7)$$

## 5.6 Formalisation mathématique des égouttements

Nous proposons dans cette section une formalisation mathématique de la distribution des égouttements afin d'avoir une fonction de distribution dépendante de la fréquence d'égouttement précédemment calculée. Nous modélisons la distribution à partir d'une fonction périodique dont les maxima correspondent à la position d'une goutte. Pour tenir compte de la résistance de l'air, nous utilisons une fonction de mappage non linéaire pour distordre l'espace. Cette fonction modélise les variations de la vitesse des gouttes en perturbant le domaine d'évaluation à partir de la gravité et de la résistance de l'air.

Considérons une fonction périodique  $f$  calibrée pour considérer une goutte tous les  $v_\infty T$  mètre(s). Cette fonction considère que toutes les gouttes ont déjà atteint leur vitesse terminale.

$$f(d) = \cos\left(\frac{2\pi}{v_\infty T} d\right). \quad (5.8)$$

Introduisons également la vitesse instantanée d'une goutte  $v(t)$  tenant compte de la résistance de l'air :

$$v(t) = v_\infty \tanh\left(\frac{g}{v_\infty} t\right) \quad (m.s^{-1}), \quad (5.9)$$

avec  $v_\infty$  la vitesse terminale en  $m.s^{-1}$ .

Dans la première partie de ce mémoire, nous avons rappelé comment exprimer la vitesse terminale d'une goutte en fonction de son diamètre.

$$v_\infty = 10 \times \sqrt{\frac{D}{5}} \quad (m.s^{-1}). \quad (5.10)$$

La fonction  $\tanh$  a une valeur limite de 1,  $v(t)$  est ainsi égale à  $v_\infty$  au-delà d'un certain temps. A partir de l'équation 5.9, nous calculons le temps  $t$  nécessaire pour qu'une goutte atteigne une distance  $d$  en tenant compte de la vitesse instantanée des gouttes et de la résistance de l'air.

$$d = \int_0^t v(t) dt \quad (5.11)$$

La solution s'écrit comme suit :

$$d = \frac{v_\infty^2}{g} \ln \cosh\left(\frac{gt}{v_\infty}\right) \quad (5.12)$$

Nous pouvons ainsi exprimer  $t$  en fonction de la distance  $d$ .

$$t(d) = \frac{v_\infty}{g} \operatorname{arccosh} \exp\left(\frac{g}{v_\infty^2} d\right) \quad (s) \quad (5.13)$$

La distance parcourue par une goutte en considérant qu'elle a atteint la vitesse terminale après  $t$  secondes sur une distance  $d$  s'exprime comme suit :

$$\begin{aligned} m(d) &= t(d) v_\infty \\ &= \frac{v_\infty^2}{g} \operatorname{arccosh} \exp\left(\frac{g}{v_\infty^2} d\right) \quad (m) \end{aligned} \quad (5.14)$$

La fonction  $m$  peut être considérée comme une fonction de mappage permettant de distordre l'espace afin de représenter une succession de gouttes à un instant donné en prenant en compte la vitesse instantanée des gouttes. La fonction de distribution  $f_m$  peut être ainsi exprimée comme une composition de la fonction périodique  $f$  et de la fonction de mappage  $m$ .

$$\begin{aligned} f_m(d) &= (f \circ m)(d) \\ &= f(m(d)) \\ &= \cos\left(\frac{2\pi v_\infty}{g T} \operatorname{arccosh} \exp\left(\frac{g}{v_\infty^2} d\right)\right) \end{aligned} \quad (5.15)$$

Il est également nécessaire d'introduire la fonction de phase  $\phi$  pour l'animation des gouttes au cours du temps.

$$\phi(t) = \frac{2\pi}{T} t \quad (rad) \quad (5.16)$$

La fonction périodique dépend désormais du temps.

$$\begin{aligned} f(d, t) &= \cos\left(\frac{2\pi}{v_\infty T} d + \phi(t)\right) \\ &= \cos\left(\frac{2\pi}{v_\infty T} d + \frac{2\pi}{T} t\right) \\ &= \cos\left(\frac{2\pi}{T} \left(\frac{1}{v_\infty} d + t\right)\right) \end{aligned} \quad (5.17)$$

Afin d'être mathématiquement rigoureux, nous définissons la fonction de mappage  $m$  en tenant compte de la variable temps.

$$m(d, t) = (m(d), t) \quad (5.18)$$

La fonction de distribution  $f_m$  permet maintenant de distribuer les gouttes dans l'espace et au cours du temps (figure 5.3).

$$\begin{aligned}
 f_m(d, t) &= (f \circ m)(d, t) \\
 &= f(m(d, t)) \\
 &= f(m(d), t) \\
 &= \cos\left(\frac{2\pi}{T}\left(\frac{v_\infty}{g} \operatorname{arccosh} \exp\left(\frac{g}{v_\infty^2} d\right) + t\right)\right)
 \end{aligned}
 \tag{5.19}$$

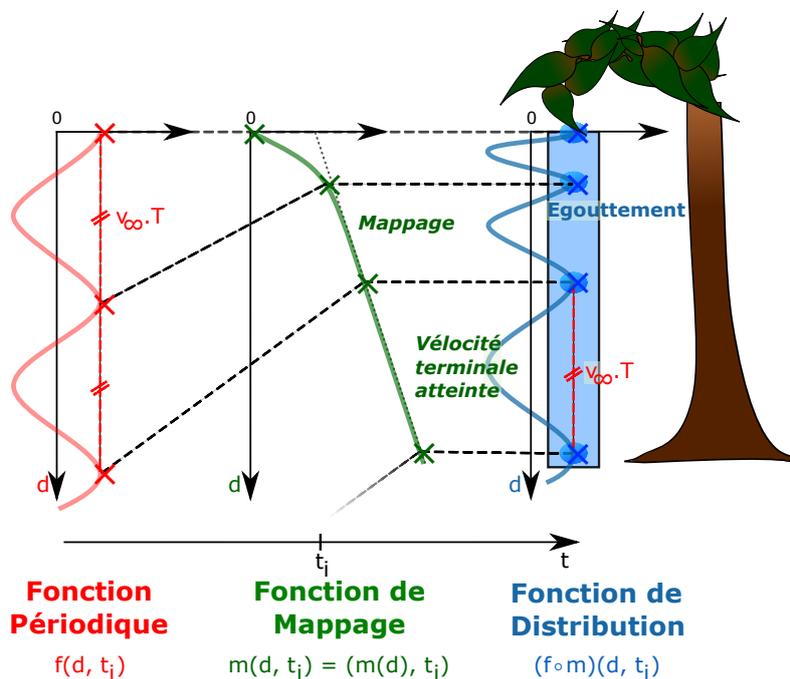


FIGURE 5.3 – La fonction de distribution  $f_m$  est la composition de la fonction périodique  $f$  et de la fonction de mappage  $m$ . L'espace d'évaluation de la fonction est distordu pour tenir compte de la vitesse instantanée des gouttes et de la résistance de l'air.

## 5.7 Synthèse

Nous avons montré dans cette étude comment exprimer les variations temporelles et spatiales des égouttements ainsi que la distribution des tailles de gouttes. Le modèle hydrologique présenté dans ce chapitre nous a permis de formaliser mathématiquement le processus d'égouttement en tenant compte des propriétés intrinsèques des arbres. Ce modèle se base tout d'abord sur un calcul de ratios afin de déterminer la proportion de pluie incidente régénérée sous la forme d'égouttements à un instant donné, à une certaine distance radiale du tronc et pour un diamètre de gouttes donné. Chaque arbre dispose d'un ensemble de paramètres influençant la distribution des égouttements provenant du feuillage. Nous en déduisons une fréquence locale d'égouttement et proposons une fonction de distribution permettant de représenter mathématiquement les égouttements en tout point de l'arbre. Ce modèle va nous permettre dans le chapitre suivant de proposer un rendu temps réel pour n'importe quel type d'arbres et pour n'importe quelle scène naturelle.

## Chapitre 6 :

# Modèle phénoménologique pour le rendu des égouttements en temps réel

## 6.1 Contexte

Dans l'environnement naturel, la végétation intercepte et retient l'eau de pluie, puis la restitue au travers, soit d'écoulements le long des branches puis du tronc, soit d'égouttements provenant des feuilles. Nous avons introduit dans la première partie de ce mémoire un nouveau modèle de pluie qui, bien qu'étant basé espace-écran, nous permet de gérer les collisions entre les gouttes et les objets présents dans n'importe quelle scène extérieure complexe. Il est toutefois nécessaire de tenir compte des interactions qui s'opèrent entre les gouttes et la végétation pour parvenir à un haut niveau de réalisme. Les nombreuses interactions opérant sous la canopée et dépendant des caractéristiques intrinsèques de l'arbre peuvent être très complexes à traiter de façon physiquement réaliste, et tout particulièrement dans le cadre d'une simulation temps-réel.

L'étude hydrologique présentée dans le chapitre précédent nous a permis de comprendre comment les égouttements peuvent être mathématiquement représentés en tout point de l'arbre en tenant compte des propriétés des arbres. Il s'agit d'une collaboration avec un chercheur spécialiste en hydrologie des forêts. Ce chercheur a mis ses relevés à notre disposition de façon à nous permettre de proposer un modèle cohérent, physiquement plausible et entièrement paramétrable par l'utilisateur. Nous allons dans ce dernier chapitre introduire un nouveau modèle temps-réel permettant de gérer efficacement les égouttements provenant de la végétation. Ce modèle vient en complément de la méthode de pluie introduite dans la première partie du mémoire. En effet, les gouttes présentes dans la scène, ainsi que celles traversant la canopée sur les résultats qui vont être présentés, sont gérées par notre modèle de pluie.

## 6.2 Synthèse de l'existant

Nous analysons dans cette partie les travaux existants portant à fois sur les méthodes de rendu de pluie mais aussi sur les simulations d'interaction gouttes/objets en rapport avec notre domaine de recherche. Nous nous appuyons sur les précédents états de l'art présentés dans les deux parties du mémoire.

Au fil des ans, le réalisme des scènes naturelles a été nettement amélioré par les méthodes de rendu de pluie [54], [15], [53], [50], [45], [40], [47], [41], [12] et [56]. Comme nous l'avons déjà mentionné, les auteurs de ces méthodes ont principalement porté leur attention sur le rendu des gouttes et des cordes. La plupart des méthodes proposent de prendre en compte les collisions des gouttes avec les objets présents dans l'environnement. En revanche, quasiment aucune ne traite des égouttements provenant d'objets complexes, comme les arbres, après interception de la pluie par ces derniers. Seuls Tatarchuk et Isodoro [51] ont proposé un rendu des égouttements, et plus spécifiquement provenant des toits, comme cela est illustré dans la vidéo de démonstration Toyshop. Les auteurs utilisent pour ce faire un système de particules dans lequel la position et la densité des gouttes sont laissées à l'appréciation de l'utilisateur. Aucun modèle scientifique ne gouverne cette simulation et le sentiment de réalisme dépend uniquement des choix totalement arbitraires de l'utilisateur.

D'autres chercheurs ont quant à eux orienté leur recherche sur l'interaction entre les gouttes et les arbres. Yang et al [59] proposent à ce titre de construire des arbres selon un modèle hiérarchique de façon à pouvoir contrôler précisément l'influence des gouttes sur chacune des feuilles. Leur méthode gère les gouttes en équilibre sur les feuilles jusqu'à leur chute. Ce papier a d'ailleurs fait l'objet de nouvelles contributions [60] afin d'améliorer le niveau de détail et l'animation des arbres au contact des gouttes. Toujours dans ce domaine de recherche, les auteurs [52], [25] et [61] ont travaillé sur le rendu des gouttes en contact avec des surfaces diverses. Toutes ces méthodes tentent de simuler un couplage dynamique entre les arbres et les gouttes, et cela d'une façon physiquement réaliste. Néanmoins, aucune de ces méthodes ne propose une véritable formulation pour modéliser le phénomène d'égouttement en temps réel, et cela en fonction des paramètres intrinsèques des arbres (espèce, indice de surface foliaire, etc.) et de l'intensité des précipitations. Le modèle hydrologique présenté dans le chapitre précédent tient compte de ces différents paramètres, et considère les phénomènes complexes intervenant sous la canopée afin d'estimer la densité des égouttements dans le temps et dans l'espace.

## 6.3 Apports

Avant de présenter notre méthode de rendu dans la section suivante, nous décrivons succinctement ci-dessous les principales contributions de notre modèle d'égouttement :

- un modèle hydrologique entièrement paramétrable et contrôlable par l'utilisateur. Le modèle simule la distribution spatiale et temporelle des égouttements sous la canopée, ainsi que la distribution des tailles de gouttes. Il s'appuie sur des mesures réelles et permet donc d'avoir une distribution réaliste des égouttements dépendant des caractéristiques intrinsèques de l'arbre comme l'espèce ou l'Indice de Surface Foliaire (ISF).
- une représentation fonctionnelle évaluée au vol et par pixel contrôlant la densité des égouttements, tout en tenant compte des propriétés physiques de chacune des gouttes. Cette représentation s'appuie sur la fonction de distribution présentée dans le chapitre précédent. Cette distribution présente l'avantage de tenir compte de la résistance de l'air et de la vitesse instantanée des gouttes.
- une implémentation efficace sur GPU permettant de représenter un grand nombre d'égouttements en temps réel. Nous utilisons une structure accélératrice afin d'évaluer rapidement les pixels de la scène influencés par les égouttements provenant du feuillage des arbres. Nous avons implémenté notre modèle dans le moteur de jeu Unreal Engine 4 afin de bénéficier d'un rendu réaliste de l'environnement.

## 6.4 Représentation fonctionnelle des égouttements

Une scène extérieure naturelle peut comprendre une végétation dense, un très grand nombre d'arbres, et tout particulièrement dans le cas de forêts. Chercher à représenter l'ensemble des égouttements dans de telles scènes peut s'avérer beaucoup trop coûteux en temps de calcul pour un rendu en temps réel. Nous présentons dans cette section notre méthode afin de représenter de façon efficace les égouttements provenant des arbres proches et visibles en nous basant sur l'étude hydrologique du chapitre précédent. Cette approche a l'avantage de pouvoir représenter le phénomène d'égouttement en tenant compte des propriétés physiques des gouttes, seule la densité est contrôlée à partir d'une approche phénoménologique. De plus, nous proposons une représentation fonctionnelle en considérant les égouttements comme un flux local de gouttes en dessous de chaque point de régénération. Cette forme fonctionnelle nous permet d'exprimer la distribution spatiale, la forme et l'apparence des gouttes au cours du temps avec un coût par pixel constant en limitant ainsi considérablement l'empreinte mémoire de la méthode. Les méthodes basées sur un système de particules nécessitent de mémoriser et de mettre à jour à chaque image les positions des gouttes. Seules les positions des arbres et des points de régénération doivent être connues grâce à notre approche fonctionnelle ; tout le reste est évalué au vol grâce aux fonctions que nous présentons dans cette section.

Avant de présenter plus en détail la forme fonctionnelle, rappelons que notre approche phénoménologique consiste à déterminer tout d'abord la fréquence locale d'égouttement en fonction des paramètres de l'arbre. Nous disposons de quatre paramètres pour évaluer cette fréquence : l'espèce de l'arbre, l'ouverture et l'épaisseur de la canopée ainsi que l'Indice de Surface Foliaire (ISF). Une fois cette fréquence déterminée pour un point de régénération donné, nous pouvons ensuite utiliser notre représentation fonctionnelle pour la distribution et le rendu des gouttes.

Pour un pixel  $p$  donné, nous cherchons à déterminer la contribution de la goutte la plus proche. Pour cela, nous rappelons la fonction  $t$ , exprimant le temps nécessaire pour une goutte pour parcourir une distance  $d$ , compte tenu de la vélocité instantanée de la goutte et de la résistance de l'air.  $d$  correspond ici à la distance entre le point de régénération et le pixel  $p$ .

$$t(d) = \frac{v_\infty}{g} \operatorname{arccosh} \exp \frac{g}{v_\infty^2} d \quad (s), \quad (6.1)$$

avec  $v_\infty$  la vélocité terminale de la goutte en  $m.s^{-1}$ ,

$g$  l'accélération en  $m.s^{-2}$ .

La fonction  $f_{ind}$  exprime l'indice ou le numéro de la goutte la plus proche du pixel à partir de l'équation 6.1.

$$f_{ind}(d) = \lfloor \frac{t(d)}{T} \rfloor + \lfloor \frac{t(d) \bmod T}{0.5T} \rfloor, \quad (6.2)$$

avec  $T$  la période locale d'égouttement en  $s$ .

La distance entre la goutte la plus proche du pixel et le point de régénération est finalement évaluée avec la fonction  $f_{dist}$ .

$$f_{dist}(d) = \frac{v_{\infty}^2}{g} \ln \cosh \frac{gT}{v_{\infty}} f_i(d) \quad (m). \quad (6.3)$$

Nous pouvons facilement déduire la position de la goutte en connaissant la position de la feuille régénératrice. Il suffit ensuite d'évaluer la distance entre le pixel  $p$  et la goutte pour déterminer si  $p$  reçoit une contribution de cette goutte compte tenu de sa taille. Garg et Nayar [16] ont d'ailleurs rappelé qu'une goutte subit deux types d'oscillations dans sa chute avec la résistance de l'air (figure 6.1). Ils rappellent également l'équation implicite permettant de déterminer la forme de la goutte à un instant  $t$  en tenant compte de ces deux modes d'oscillations.

$$r(t, \theta, \phi) = 0.5D [ 1 + A_{2,0} \sin(\omega 2t) P_{2,0}(\cos \theta) + A_{3,1} \sin(\omega 3t) P_{3,1}(\cos \theta) \sin(\phi) ] \quad (mm) \quad (6.4)$$

avec  $D$  le diamètre de la goutte avant distorsion en  $mm$ ,

$A_{2,0}$  et  $A_{3,1}$  les amplitudes respectives des harmoniques sphériques pour les modes (2,0) et (3,1),

$P_{2,0}$  et  $P_{3,1}$  les polynômes de Legendre décrivant la forme de la goutte pour les deux modes d'oscillations.

Nous faisons le rendu des gouttes en utilisant une carte d'environnement et des calculs de réfraction. La taille de carte d'environnement peut être adaptée selon la qualité du rendu désirée, ainsi que selon la distance à laquelle les gouttes sont visualisées. Nous obtenons au final une représentation fonctionnelle évaluée au vol et par pixel, gérant à la fois la distribution, la forme et le rendu des gouttes avec un contrôle de la densité au travers de paramètres intuitifs.

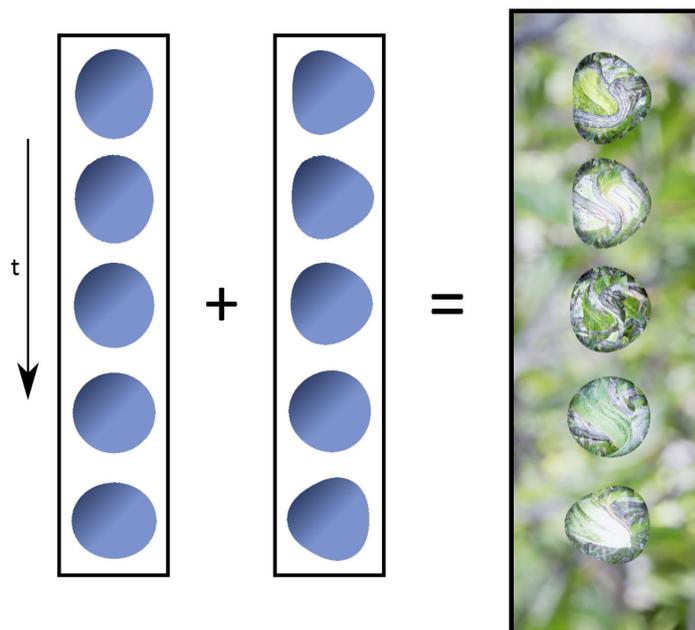


FIGURE 6.1 – Deux modes d'oscillations d'une goutte au cours du temps selon Garg et Nayar [16]

## 6.5 Implémentation

Notre méthode prend des modèles 3D d'arbres ainsi qu'un ensemble de points de régénération possibles pour chaque modèle comme données d'entrée. Ces positions peuvent être calculées de différentes manières, à l'aide d'une simulation de fluide basée physique, ou encore avec une distribution manuelle des points de régénération. Nous avons choisi de pré-calculer ces positions à l'aide d'un lancer de rayons afin de rechercher facilement des feuilles visibles depuis le sol. Une fois ce pré-calcul effectué, notre modèle d'égouttement est indépendant de la complexité de la scène. L'algorithme est contenu dans un seul nuanceur conduisant à une implémentation simple dans la plupart des moteurs graphiques.

Chaque pixel peut en théorie être affecté par toutes les gouttes. Calculer la contribution de toutes les gouttes de la scène pour chaque pixel augmenterait de manière disproportionnée les temps de calcul et la complexité algorithmique. Pour notre implémentation temps réel, nous utilisons des imposteurs correspondant à des plans constamment alignés face à l'écran afin de représenter le processus d'égouttement sous chaque point de régénération. Ces imposteurs jouent le rôle de structures accélératrices permettant d'évaluer uniquement la contribution des gouttes issues du même point de régénération. Le processus de distribution et de rendu des gouttes contenu dans un matériau se déclenche automatiquement lorsque le plan est visible à l'écran. Nous garantissons ainsi l'efficacité de la méthode en limitant les calculs par pixel et en représentant uniquement les gouttes visibles à l'écran.

## 6.6 Résultats

La méthode est implémentée sur Unreal Engine 4 avec une Geforce GTX 980 en résolution 720p. Le rendu de la scène tourne à 60 images par seconde et à 50 images par seconde avec le rendu de la pluie. Le rendu de la pluie avec les égouttements fonctionne à 35 images par seconde en considérant 15k points de régénération visibles. Ce nombre a été déterminé de façon empirique. 15k points de régénération semblent être suffisants pour obtenir un rendu réaliste dans des scènes complexes. Ces positions peuvent être automatiquement activées ou désactivées selon la distance entre l'arbre et l'observateur ou lorsque l'arbre sort du champ de vision de la caméra. Nous montrons le rendu d'une scène naturelle (figure 6.2) avec la pluie uniquement (figure 6.3), avec la pluie et les égouttements (figure 6.4) et avec les égouttements uniquement (figure 6.5). Chaque arbre dispose de paramètres internes, mais un seul paramètre global gouverne la simulation : l'intensité des précipitations. Il s'agit d'ailleurs de l'unique paramètre pour la méthode de rendu de pluie présentée dans la première partie du mémoire. Au travers de cet unique paramètre, nous pouvons désormais obtenir un rendu réaliste de pluie et de la dégradation optique tout en représentant les égouttements provenant des arbres. L'ensemble des phénomènes visibles liés à la pluie sont maintenant corrélés au travers d'un seul et même paramètre. Nous proposons également une vision du rendu depuis l'intérieur de l'arbre afin de voir comment le phénomène d'égouttement est perçu (figure 6.6). La figure 6.7 montre quant à elle le rendu des égouttements vus de l'intérieur et de l'extérieur de l'arbre en fonction de l'intensité des précipitations. Plus l'intensité des précipitations est élevée, plus la quantité d'égouttement est importante. La densité des gouttes est contrôlée par le modèle hydrologique. Les temps de calcul restent constants localement pour chaque point de régénération. Il est intéressant de noter que nous pourrions obtenir des résultats équivalents en utilisant un système de particules. Cela nécessiterait néanmoins de garder constamment à jour la mémoire tampon représentant les positions et vitesses de chacune des particules.



FIGURE 6.2 – Scène naturelle d'origine

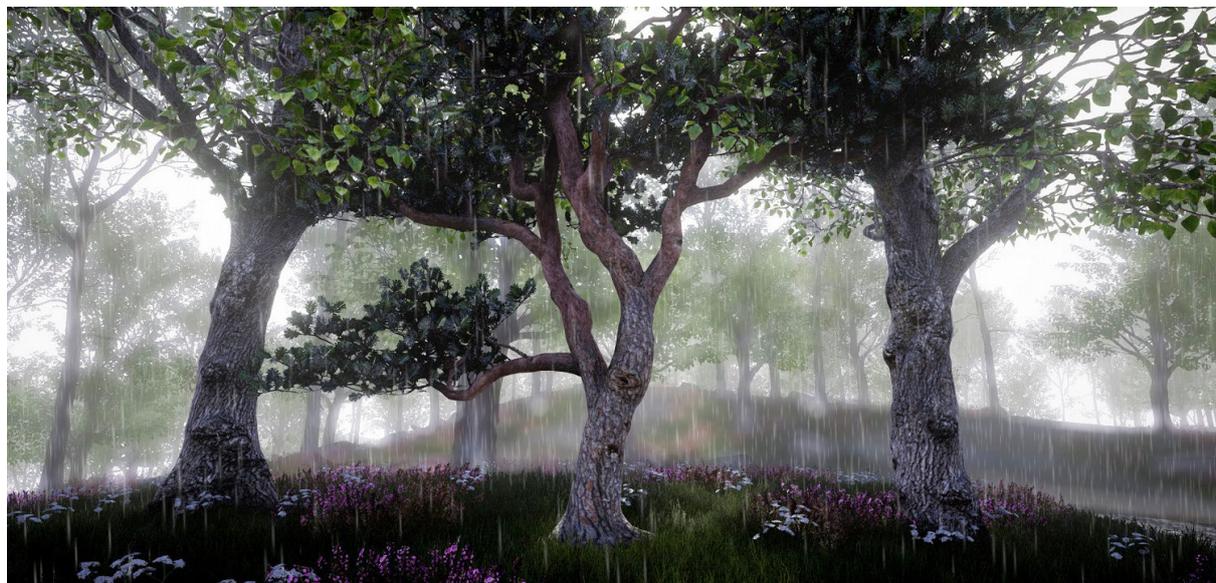


FIGURE 6.3 – Scène naturelle avec la pluie uniquement

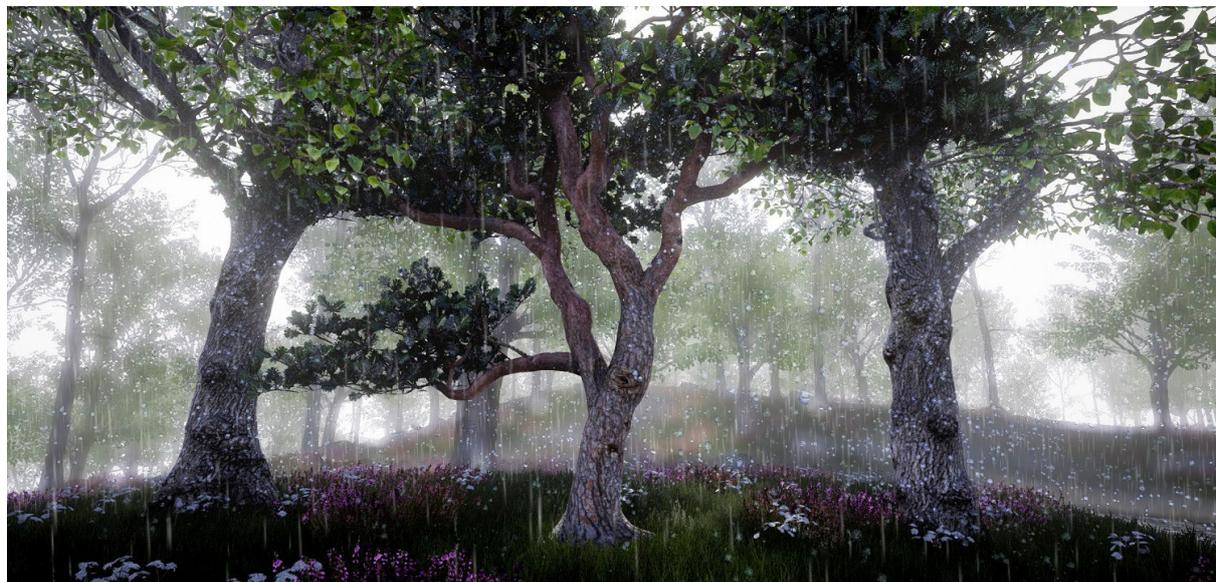


FIGURE 6.4 – Scène naturelle avec la pluie et les égouttements

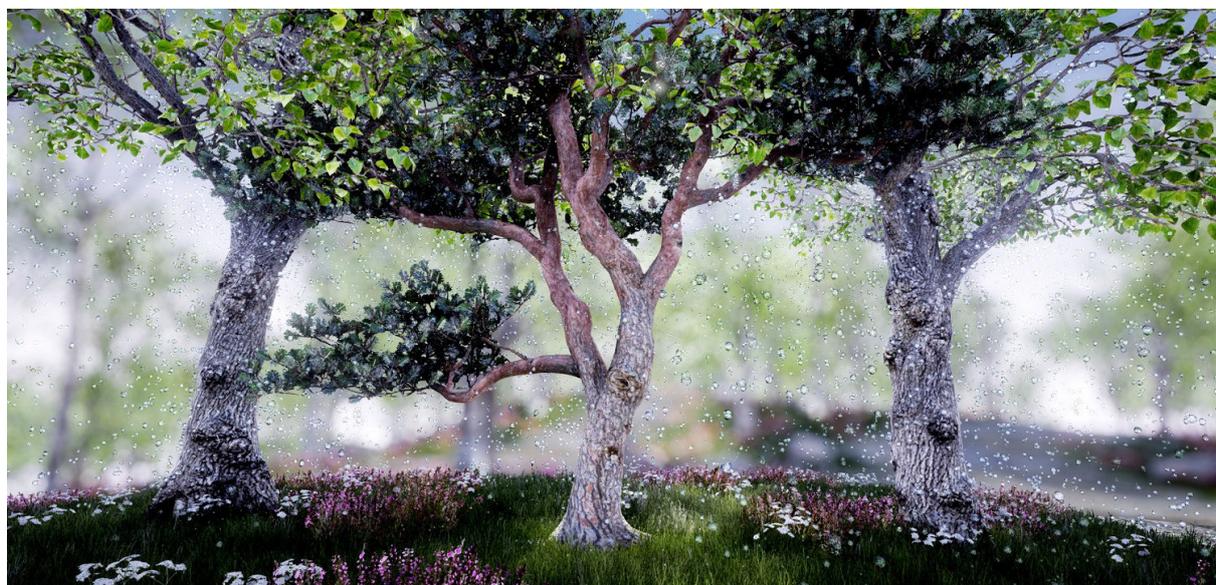


FIGURE 6.5 – Scène naturelle avec les égouttements uniquement

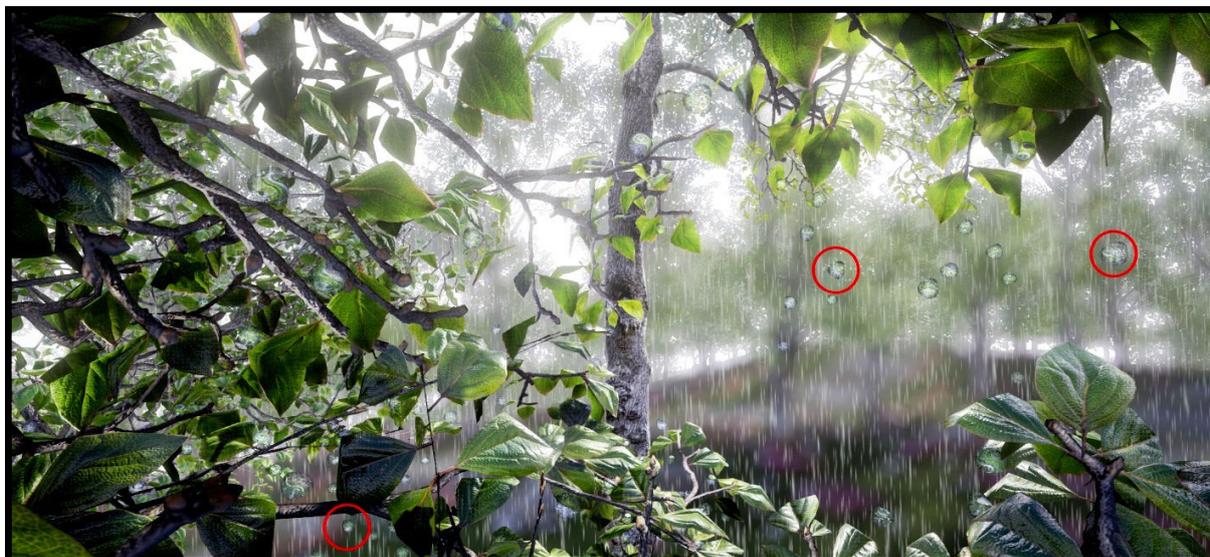


FIGURE 6.6 – Égouttements vus de l'intérieur de l'arbre



FIGURE 6.7 – Égouttements vus de l'intérieur et de l'extérieur de l'arbre selon deux intensités de pluie

# Conclusion et perspectives

## Conclusion

Nous avons présenté dans la première partie du mémoire une méthode multi-échelle pour le rendu de la pluie. Cette méthode a fait l'objet d'une publication [56] dans la revue *Computers & Graphics* en 2015. Elle tient compte aussi bien des propriétés locales que des propriétés globales de ce phénomène afin d'obtenir une corrélation entre les différentes échelles de perception et donc des résultats visuellement plus cohérents. Nous avons en effet montré qu'il est nécessaire de tenir compte des deux échelles de visibilité de la pluie pour parvenir à un rendu cohérent et réaliste. Les calculs concernant la génération des cordes et l'atténuation de la visibilité se basent sur la même distribution des tailles de gouttes [34] et dépendent d'un seul paramètre : l'intensité des précipitations. La simulation de pluie peut être mise à jour en temps réel via cet unique paramètre. La densité des cordes visibles et le phénomène d'extinction sont ainsi recalculés au vol.

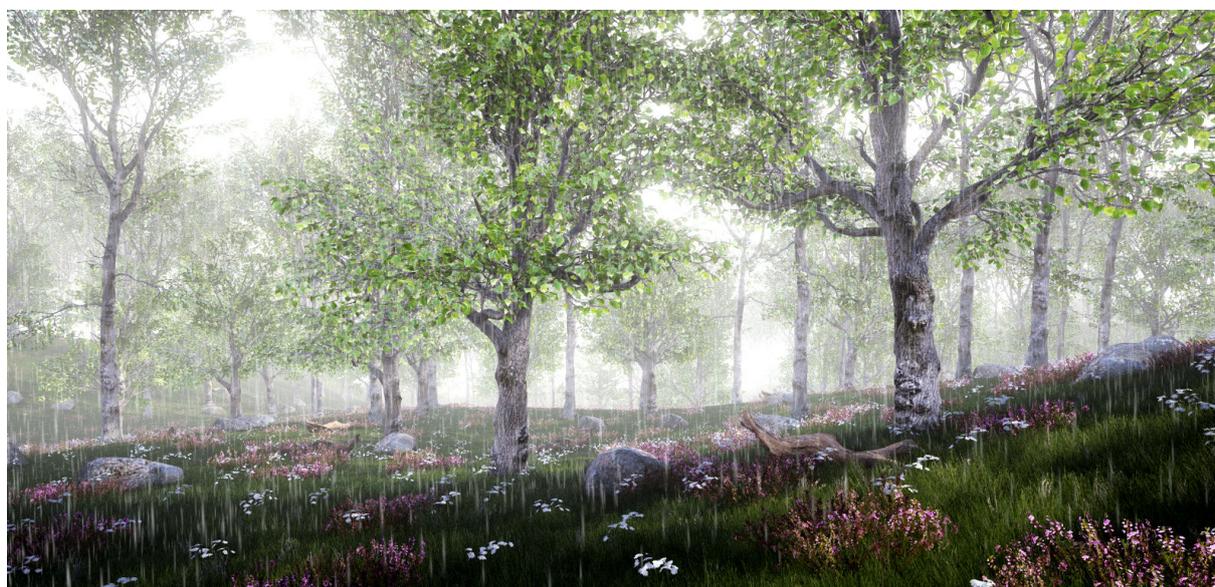


FIGURE 6.8 – Rendu d'une pluie forte

Dans la seconde partie du mémoire, nous avons introduit une nouvelle méthode pour le rendu des égouttements provenant du feuillage des arbres. Cette méthode a fait elle aussi l'objet d'une présentation à la conférence Eurographics Symposium on Rendering (EGSR) ainsi qu'une publication [57] au journal *Computer Graphics Forum (CGF)* en 2016. Notre approche phénoménologique basée sur une étude hydrologique tient compte des paramètres intrinsèques des arbres pour déterminer la distribution des égouttements dans le temps et dans l'espace pour chaque taille de gouttes. Notre représentation fonctionnelle nous permet de contrôler efficacement la distribution, la forme et la densité des égouttements à tout instant pendant la simulation. Nous montrons également que

l'implémentation choisie permet de gérer un grand nombre de gouttes en temps réel. La méthode présente l'avantage d'être indépendante de la complexité de la scène.

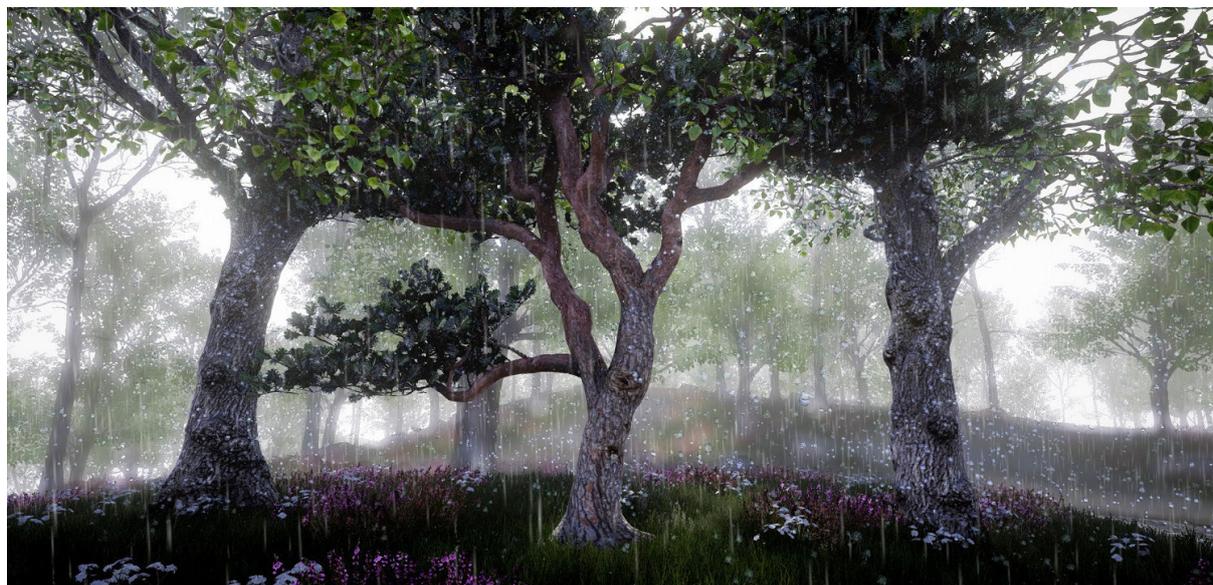


FIGURE 6.9 – Scène naturelle avec la pluie et les égouttements

Les figures 6.8 et 6.9 montrent respectivement une scène naturelle sous la pluie sans et avec les égouttements. Nous voyons ainsi l'importance de la seconde méthode : celle-ci nous permet d'obtenir des scènes visuellement plus réalistes puisque nous tenons compte désormais des interactions avec l'environnement naturel. Le modèle hydrologique approxime à lui seul les interactions au sein de l'arbre, l'implémentation pour représenter le flux de gouttes sous chaque point de régénération fait le reste. La combinaison des deux méthodes offre des résultats visuellement plus réalistes par rapport à ce que les autres méthodes ont proposé jusqu'à présent.

## Perspectives

### Rendu de la pluie

La méthode de rendu de pluie présente en l'état certaines limites. Concernant l'animation de la texture procédurale, nous n'animons pas la texture en fonction des mouvements latéraux de la caméra. Nous ne préservons donc pas la position des cordes lorsque la caméra bouge. Néanmoins, cela n'impacte en rien la qualité visuelle de l'animation. La vitesse des gouttes s'avère être beaucoup plus élevée que la vitesse des mouvements de la caméra.

Une autre difficulté consiste à gérer les mouvements de la caméra lorsque celle-ci est dirigée vers le haut ou vers le bas. En effet, les cordes ne peuvent être ni générées ni animées de la même façon dans ce cas précis. Cela implique donc de générer des cordes tout en prenant en compte l'orientation verticale de la caméra. Nous n'avons pas évoqué ce problème jusqu'à présent. Néanmoins, une solution évoquée dans le papier [54] consisterait à utiliser un double cône sur lequel la texture pourrait défiler. Le double cône serait systématiquement aligné par rapport à la caméra de façon à tenir compte des mouvements verticaux et à retrouver ainsi un écoulement naturel de la pluie lorsque la direction de vue est amenée à changer. Nous pensons qu'il serait également possible de tenir compte de cet aspect directement dans la génération des cordes. Cela nécessiterait une analyse pour évaluer la façon dont l'apparence des cordes évolue selon l'orientation de la caméra.

Les précédents travaux [15] [9] prennent en compte différentes sources lumineuses dans la scène pour le rendu des cordes. Il est certain que ce phénomène est très important pour acquérir un bon niveau de réalisme, et nous devons donc l'intégrer par la suite dans notre méthode de génération. Comme cela a déjà été dit, une connaissance de la position et des propriétés de chacune des lumières ainsi que l'utilisation de la fonction de phase de Henyey-Greenstein doivent nous permettre de calculer en temps réel et sans surcoût excessif la quantité de lumière devant parvenir jusqu'à notre œil. Un découpage de l'espace permettrait de ne prendre en compte une lumière que lorsqu'une corde donnée se trouve dans sa sphère d'influence. La fonction de phase permettrait quant à elle de calculer la contribution de chacune des lumières candidates dans le rendu de chacune des cordes.

### Rendu des égouttements

Bien que notre rendu des égouttements donne de bons résultats visuellement, certaines limitations subsistent dans notre implémentation actuelle. Plusieurs phénomènes tels que les éclaboussures sous la canopée ne sont pas représentés par notre modèle. Lorsque l'eau goutte d'une feuille, elle peut être interceptée par une autre feuille en dessous. Cela génère une éclaboussure et donc de multiples nouvelles gouttelettes. Des études hydrologiques ont

déjà étudié ce phénomène, et bien que nous soyons capables de déterminer la proportion de gouttes issues de ce phénomène, d'autres problèmes subsistent pour sa représentation. L'animation de l'éclaboussure et les collisions au sein de l'arbre ne sont pas triviales à traiter et nécessitent une étude plus approfondie pour proposer une solution simple et efficace.

Les positions à partir desquelles les égouttements sont générés ont été pré-calculées à l'aide d'un lancer de rayons classique. Nous considérons dans notre modèle que seules les feuilles visibles du sol vont libérées des gouttes. Cela signifie que notre méthode ne gère pas les égouttements en cascade. Cela nécessiterait d'avoir une meilleure connaissance de la structure de l'arbre et de le discrétiser en plusieurs couches horizontales.

De plus, le modèle hydrologique se base sur l'Indice de Surface Foliaire (ISF) pour déterminer la distribution temporelle des égouttements. Nous ne proposons en l'état aucune méthode pour déterminer la valeur de ce paramètre. Il serait en effet intéressant d'évaluer de façon automatique ce paramètre en fonction de la structure de l'arbre et de la densité du feuillage.

Nous savons enfin que d'autres phénomènes naturels influencent les égouttements tels que le vent, les turbulences ou encore les interactions avec l'utilisateur. Ces facteurs externes ne sont pas pris en compte pour l'instant dans notre forme fonctionnelle. Cette dernière assure en l'état uniquement un contrôle sur la distribution et la forme des gouttes en tenant compte de la résistance de l'air, mais ne gère pas les autres facteurs externes venant perturber la distribution des égouttements. Kato et al [26] ont insisté sur la difficulté de corrélérer l'intensité du vent et la distribution des égouttements dans la nature. De nouvelles simulations hydrologiques en intérieur et en extérieur pourraient peut-être conduire à une meilleure compréhension du phénomène. Cela permettrait d'obtenir des résultats toujours plus réalistes.

## Bibliographie

- [1] F. ANDRÉ et al. « Spatial and temporal patterns of throughfall volume in a deciduous mixed-species stand ». In : *Journal of Hydrology* 400.1–2 (2011), p. 244–254.
- [2] David ATLAS. « Optical extinction by rainfall. » In : *J. Meteor.* Volume 10 (1953), p. 486–488.
- [3] Peter C. BARNUM, Srinivasa NARASIMHAN et Takeo KANADE. « Analysis of Rain and Snow in Frequency Space ». In : *International Journal of Computer Vision* 86.2 (2009), p. 256–274. ISSN : 1573-1405. DOI : [10.1007/s11263-008-0200-2](https://doi.org/10.1007/s11263-008-0200-2). URL : <http://dx.doi.org/10.1007/s11263-008-0200-2>.
- [4] C. BEIER, K. HANSEN et P. GUNDERSEN. « Spatial variability of throughfall fluxes in a spruce forest ». In : *Environmental Pollution* 81.3 (1993), p. 257–267.
- [5] Eric BRUNETON et Fabrice NEYRET. « Precomputed Atmospheric Scattering ». In : *Computer Graphics Forum* 27.4 (2008), p. 1079–1086. ISSN : 1467-8659. DOI : [10.1111/j.1467-8659.2008.01245.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2008.01245.x). URL : <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8659.2008.01245.x>.
- [6] T. J. CARLETON et Trudy KAVANAGH. « Influence of stand age and spatial location on throughfall chemistry beneath black spruce ». In : *Canadian Journal of Forest Research* 20.12 (1990), p. 1917–1925.
- [7] Darryl E. CARLYLE-MOSES et John H. C. GASH. « Forest Hydrology and Biogeochemistry : Synthesis of Past Research and Future Directions ». In : Dordrecht : Springer Netherlands, 2011. Chap. Rainfall Interception Loss by Forest Canopies, p. 407–423.
- [8] Eva CEREZO et al. « A Survey on Participating Media Rendering Techniques ». In : *the Visual Computer* (2005). URL : <http://maverick.inria.fr/Publications/2005/CPSS05>.
- [9] Wang CHANGBO et al. « Real-time Modeling and Rendering of Raining Scenes ». In : *Vis. Comput.* 24.7 (juil. 2008), p. 605–616. ISSN : 0178-2789. DOI : [10.1007/s00371-008-0241-0](https://doi.org/10.1007/s00371-008-0241-0).
- [10] Robert L. COOK. « Stochastic Sampling in Computer Graphics ». In : *ACM Trans. Graph.* 5.1 (jan. 1986), p. 51–72. ISSN : 0730-0301. DOI : [10.1145/7529.8927](https://doi.org/10.1145/7529.8927).
- [11] Fabio Gagliardi COZMAN et Eric KROTKOV. « Depth from Scattering. » In : *CVPR*. IEEE Computer Society, 1997, p. 801–806.
- [12] Carles CREUS et Gustavo PATOW. «  $R^4$  : Realistic rain rendering in realtime ». In : *Computers & Graphics* 37.1-2 (2013), p. 33–40.

- [13] Yoshinori DOBASHI, Tsuyoshi YAMAMOTO et Tomoyuki NISHITA. « Interactive Rendering of Atmospheric Scattering Effects Using Graphics Hardware ». In : *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware*. HWWS '02. Saarbrücken, Germany : Eurographics Association, 2002, p. 99–107. ISBN : 1-58113-580-7. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=569046.569060>.
- [14] J. D. Deans E. D. FORD. « The Effects of Canopy Structure on Stemflow, Throughfall and Interception Loss in a Young Sitka Spruce Plantation ». In : *Journal of Applied Ecology* 15.3 (1978), p. 905–917.
- [15] Kshitiz GARG et Shree K. NAYAR. « Photorealistic Rendering of Rain Streaks ». In : *ACM SIGGRAPH 2006 Papers*. SIGGRAPH '06. Boston, Massachusetts : ACM, 2006, p. 996–1002. ISBN : 1-59593-364-6. DOI : [10.1145/1179352.1141985](https://doi.org/10.1145/1179352.1141985).
- [16] Kshitiz GARG et Shree K. NAYAR. « Vision and Rain ». In : *Int. J. Comput. Vision* 75.1 (oct. 2007), p. 3–27. ISSN : 0920-5691. DOI : [10.1007/s11263-006-0028-6](https://doi.org/10.1007/s11263-006-0028-6). URL : <http://dx.doi.org/10.1007/s11263-006-0028-6>.
- [17] G. GILET et al. « Local random-phase noise for procedural texturing ». In : *ACM Transactions on Graphics* 33.6 (nov. 2014), N/A. DOI : [2661229](https://doi.org/10.1145/2661229).
- [18] Stanley R. HERWITZ. « Raindrop impact and water flow on the vegetative surfaces of trees and the effects on stemflow and throughfall generation ». In : *Earth Surface Processes and Landforms* 12.4 (1987), p. 425–432.
- [19] Naty HOFFMAN et Arcot J. PREETHAM. « Rendering Outdoor Light Scattering in Real Time ». In : *Game Developers Conference*. 2002.
- [20] M. INAKAGE. « An Illumination Model for Atmospheric Environments ». In : *New Advances in Computer Graphics : Proceedings of CG International '89*. Sous la dir. de Rae A. EARNSHAW et Brian WYVILL. Tokyo : Springer Japan, 1989, p. 533–548. ISBN : 978-4-431-68093-2. DOI : [10.1007/978-4-431-68093-2\\_34](https://doi.org/10.1007/978-4-431-68093-2_34). URL : [http://dx.doi.org/10.1007/978-4-431-68093-2\\_34](http://dx.doi.org/10.1007/978-4-431-68093-2_34).
- [21] John IRWIN. « Full-Spectral Rendering of the Earth's Atmosphere using a Physical Model of Rayleigh Scattering ». In : *In Proc. 14th Eurographics UK Conference*. 1996, p. 103–115.
- [22] D. JACKÈL et B. WALTER. « Modeling and Rendering of the Atmosphere Using Mie-Scattering ». In : *Computer Graphics Forum* 16.4 (1997), p. 201–210. ISSN : 1467-8659. DOI : [10.1111/1467-8659.00180](https://doi.org/10.1111/1467-8659.00180). URL : <http://dx.doi.org/10.1111/1467-8659.00180>.
- [23] Wojciech JAROSZ. « Efficient Monte Carlo Methods for Light Transport in Scattering Media ». Thèse de doct. UC San Diego, sept. 2008.

- [24] Kazufumi KANEDA et al. « Photorealistic image synthesis for outdoor scenery under various atmospheric conditions ». In : *The Visual Computer* 7.5 (1991), p. 247–258. ISSN : 1432-2315. DOI : [10.1007/BF01905690](https://doi.org/10.1007/BF01905690). URL : <http://dx.doi.org/10.1007/BF01905690>.
- [25] Kazukumi KANEDA, Shinya IKEDA et Hideo YAMASHITA. « Animation of water droplets moving down a surface ». In : *The Journal of Visualization and Computer Animation* 10.1 (1999), p. 15–26. ISSN : 1099-1778.
- [26] Hiroaki KATO et al. « Effect of canopy interception on spatial variability and isotopic composition of throughfall in Japanese cypress plantations ». In : *Journal of Hydrology* 504 (2013), p. 1–11.
- [27] R.F. KEIM, A.E. SKAUGSET et M. WEILER. « Temporal persistence of spatial patterns in throughfall ». In : *Journal of Hydrology* 314.1–4 (2005), p. 263–274.
- [28] J. KITTREDGE, H. J. LOUGHEAD et A. MAZURAK. « Interception and Stemflow in a Pine Plantation ». In : *Journal of Forestry* 39.6 (1941-06-01T00 :00 :00), p. 505–522.
- [29] R. Victor KLASSEN. « Modeling the Effect of the Atmosphere on Light ». In : *ACM Trans. Graph.* 6.3 (juil. 1987), p. 215–237. ISSN : 0730-0301. DOI : [10.1145/35068.35071](https://doi.org/10.1145/35068.35071). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/35068.35071>.
- [30] Michael S. LANGER et al. « A Spectral-particle hybrid method for rendering falling snow. » In : *Rendering Techniques*. Sous la dir. d'Alexander KELLER et Henrik Wann JENSEN. Eurographics Association, 2004, p. 217–226.
- [31] Delphis F. LEVIA et al. « Forest Hydrology and Biogeochemistry : Synthesis of Past Research and Future Directions ». In : Dordrecht : Springer Netherlands, 2011. Chap. Throughfall and Stemflow in Wooded Ecosystems, p. 425–443.
- [32] J. P. LEWIS. « Algorithms for Solid Noise Synthesis ». In : *SIGGRAPH Comput. Graph.* 23.3 (juil. 1989), p. 263–270. ISSN : 0097-8930. DOI : [10.1145/74334.74360](https://doi.org/10.1145/74334.74360).
- [33] D. LOUSTAU et al. « Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy ». In : *Journal of Hydrology* 138.3 (1992), p. 449–467.
- [34] J. S. MARSHALL et W. M. PALMER. « The distribution of raindrops with size. » In : *J. Meteorol.* 5 (1948), p. 165–166.
- [35] Kazuki NANKO, Norifumi HOTTA et Masakazu SUZUKI. « Evaluating the influence of canopy species and meteorological factors on throughfall drop size distribution ». In : *Journal of Hydrology* 329.3–4 (2006), p. 422–431.

- [36] Kazuki NANKO et al. « Physical interpretation of the difference in drop size distributions of leaf drips among tree species ». In : *Agricultural and Forest Meteorology* 169.Complete (2013), p. 74–84.
- [37] Kazuki NANKO et al. « Spatial variability of throughfall under a single tree : Experimental study of rainfall amount, raindrops, and kinetic energy ». In : *Agricultural and Forest Meteorology* 151.9 (2011), p. 1173–1182.
- [38] Tomoyuki NISHITA et al. « Display Method of the Sky Color Taking Into Account Multiple Scattering ». In : *Proceedings of the Fourth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*. 1996.
- [39] A. J. PREETHAM, Peter SHIRLEY et Brian SMITS. « A Practical Analytic Model for Daylight ». In : *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '99. New York, NY, USA : ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999, p. 91–100. ISBN : 0-201-48560-5. DOI : [10.1145/311535.311545](https://doi.org/10.1145/311535.311545). URL : <http://dx.doi.org/10.1145/311535.311545>.
- [40] Anna PUIG-CENTELLES, Oscar RIPOLLES et Miguel CHOVER. « Creation and Control of Rain in Virtual Environments ». In : *Vis. Comput.* 25.11 (oct. 2009), p. 1037–1052. ISSN : 0178-2789. DOI : [10.1007/s00371-009-0366-9](https://doi.org/10.1007/s00371-009-0366-9).
- [41] Anna PUIG-CENTELLES et al. « Rain Simulation in Dynamic Scenes. » In : *IJCICG* 2.2 (2011), p. 23–36.
- [42] Kirk RILEY et al. « Efficient Rendering of Atmospheric Phenomena ». In : *Proceedings of the Fifteenth Eurographics Conference on Rendering Techniques*. EGSR'04. Norrköping, Sweden : Eurographics Association, 2004, p. 375–386. ISBN : 3-905673-12-6. DOI : [10.2312/EGWR/EGSR04/375-386](https://doi.org/10.2312/EGWR/EGSR04/375-386). URL : <http://dx.doi.org/10.2312/EGWR/EGSR04/375-386>.
- [43] A.J. ROBSON et al. « Spatial variations in throughfall chemistry at the small plot scale ». In : *Journal of Hydrology* 158.1–2 (1994), p. 107–122.
- [44] Pierre ROUSSEAU. « Simulation réaliste de pluie en temps-réel ». In : *Mémoire de thèse* (2007).
- [45] Pierre ROUSSEAU, Vincent JOLIVET et Djamchid GHAZANFARPOUR. « GPU Rainfall. » In : *J. Graphics Tools* 13.4 (2008), p. 17–33.
- [46] Pierre ROUSSEAU, Vincent JOLIVET et Djamchid GHAZANFARPOUR. « Realistic real-time rain rendering ». In : *Computers & Graphics* 30.4 (2006), p. 507–518.

- [47] Marcos SLOMP et al. « Photorealistic Real-time Rendering of Spherical Raindrops with Hierarchical Reflective and Refractive Maps ». In : *Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. I3D '10. Washington, D.C. : ACM, 2010, 3 :1–3 :1. ISBN : 978-1-60558-939-8. DOI : [10.1145/1730804.1730975](https://doi.org/10.1145/1730804.1730975).
- [48] Jaroslav SLOUP. « A Survey of the Modelling and Rendering of the Earth's Atmosphere ». In : *Proceedings of the 18th Spring Conference on Computer Graphics*. SCCG '02. Budmerice, Slovakia : ACM, 2002, p. 141–150. ISBN : 1-58113-608-0. DOI : [10.1145/584458.584482](https://doi.org/10.1145/584458.584482). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/584458.584482>.
- [49] Benjamin B. STOUT et Richard J. MCMAHON. « Throughfall variation under tree crowns ». In : *Journal of Geophysical Research* 66.6 (1961), p. 1839–1843.
- [50] Sarah TARIQ. « Rain ». In : *Nvidia White Paper* (2007).
- [51] Natalya TATARCHUK et John ISIDORO. « Artist-Directable Real-Time Rain Rendering in City Environments ». In : *Proceedings of the Eurographics Workshop on Natural Phenomena, NPH 2006, Vienna, Austria, 2006*. Sous la dir. de Norishige CHIBA et Eric GALIN. Eurographics Association, 2006, p. 61–73. ISBN : 3-905673-38-X.
- [52] Huamin WANG, Peter J. MUCHA et Greg TURK. « Water Drops on Surfaces ». In : *ACM Trans. Graph.* 24.3 (juil. 2005), p. 921–929. ISSN : 0730-0301.
- [53] Lifeng WANG et al. « Real-time Rendering of Realistic Rain ». In : *ACM SIGGRAPH 2006 Sketches*. SIGGRAPH '06. Boston, Massachusetts : ACM, 2006. ISBN : 1-59593-364-6.
- [54] Niniane WANG et Bretton WADE. « Rendering Falling Rain and Snow ». In : *ACM SIGGRAPH 2004 Sketches*. SIGGRAPH '04. Los Angeles, California : ACM, 2004, p. 14–. ISBN : 1-58113-896-2. DOI : [10.1145/1186223.1186241](https://doi.org/10.1145/1186223.1186241).
- [55] Tsutomu WATANABE et Kanji MIZUTANI. « Model study on micrometeorological aspects of rainfall interception over an evergreen broad-leaved forest ». In : *Agricultural and Forest Meteorology* 80.2–4 (1996), p. 195–214.
- [56] Yoann WEBER et al. « A multiscale model for rain rendering in real-time ». In : *Computers And Graphics* 50 (2015), p. 61–70.
- [57] Yoann WEBER et al. « A Phenomenological Model for Throughfall Rendering in Real-time ». In : *Computer Graphics Forum* (2016). ISSN : 1467-8659. DOI : [10.1111/cgf.12945](https://doi.org/10.1111/cgf.12945).

- [58] M.J WHELAN et al. « Spatial patterns of throughfall and mineral ion deposition in a lowland Norway spruce (*Picea abies*) plantation at the plot scale ». In : *Atmospheric Environment* 32.20 (1998), p. 3493–3501.
- [59] Meng YANG et al. « Interactive coupling between a tree and raindrops. » In : *Journal of Visualization and Computer Animation* 23.3-4 (2012), p. 267–277.
- [60] Meng YANG et al. « Physically-based Animation for Realistic Interactions Between Tree Branches and Raindrops ». In : *Proceedings of the 17th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. VRST '10. Hong Kong : ACM, 2010, p. 83–86. ISBN : 978-1-4503-0441-2.
- [61] Yizhong ZHANG et al. « A Deformable Surface Model for Real-Time Water Drop Animation ». In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 18.8 (août 2012), p. 1281–1289. ISSN : 1077-2626.



## **Rendu multi-échelle de pluie et interaction avec l'environnement naturel en temps réel**

### **Résumé :**

La représentation des phénomènes météorologiques est un enjeu essentiel en Informatique Graphique dans l'optique d'obtenir des scènes extérieures visuellement réalistes. Depuis quelques années, les chercheurs se sont penchés sur la simulation de la pluie en synthèse d'images. Ce mémoire a pour but de présenter deux méthodes de rendu : une première méthode pour le rendu de la pluie, et une seconde pour le rendu des égouttements provenant des arbres. Notre modèle de rendu de pluie est une méthode multi-échelle permettant de tenir compte des propriétés locales et globales de ce phénomène. Nous avons réussi à mettre en corrélation la densité des gouttes proches de l'observateur (échelle mésoscopique) avec l'atténuation de la visibilité (échelle macroscopique), en fonction d'un seul paramètre global cohérent : l'intensité des précipitations. Cette méthode a fait l'objet d'une publication [56] dans la revue *Computers & Graphics* en 2015. D'autre part, nous basons notre méthode pour le rendu des égouttements sur une approche phénoménologique. Une telle approche s'avère plus adaptée pour gérer les grands espaces, et présente l'avantage d'être indépendante de la complexité de la scène. L'approche choisie s'appuie sur des expérimentations et des mesures hydrologiques effectuées par des chercheurs spécialisés dans l'hydrologie des forêts. Nous proposons ainsi un modèle d'égouttement cohérent, tenant compte des propriétés intrinsèques à chaque type d'arbres. Cette méthode a fait elle aussi l'objet d'une présentation à la conférence Eurographics Symposium on Rendering (EGSR) ainsi qu'une publication [57] au journal *Computer Graphics Forum* (CGF) en 2016.

**Mots clés :** rendu de pluie, multi-échelle, temps réel, rendu atmosphérique, interaction, égouttement, canopée, arbre.

## **Multiscale rain rendering and interaction with the natural environment in real-time**

### **Abstract :**

This dissertation aims to present a coherent multiscale model for real-time rain rendering which takes into account local and global properties of rainy scenes. Our goal is to simulate visible rain streaks close to the camera as well as the progressive loss of visibility induced by atmospheric phenomena. Our model proposes to correlate the attenuation of visibility, which is due in part to the extinction phenomenon, and the distribution of raindrops in terms of rainfall intensity and camera's parameters. Furthermore, this method proposes an original rain streaks generation based on spectral analysis and sparse convolution theory. This allows an accurate control of rainfall intensity and streaks appearance, improving the global realism of rainy scenes. We also aim at rendering interactive visual effects inherent to complex interactions between trees and rain in real-time in order to increase the realism of natural rainy scenes. Such a complex phenomenon involves a great number of physical processes influenced by various interlinked factors and its rendering represents a thorough challenge in Computer Graphics. We approach this problem by introducing an original method to render drops

dripping from leaves after interception of raindrops by foliage. Our method introduces a new hydrological model representing interactions between rain and foliage through a phenomenological approach. Our model reduces the complexity of the phenomenon by representing multiple dripping drops with a new fully functional form evaluated per-pixel on-the-fly and providing improved control over density and physical properties. Furthermore, an efficient real-time rendering scheme, taking full advantage of latest GPU hardware capabilities, allows the rendering of a large number of dripping drops even for complex scenes.

**Keywords :** rain rendering, multiscale, real time, atmospheric rendering, interaction, throughfall, canopy, tree.

**XLIM - UMR CNRS n°7252**  
123, avenue Albert Thomas - 87060 LIMOGES CEDEX