



HAL
open science

Caractérisation, modélisation et simulation des effets visuels du brouillard pour l'utilisateur de la route

Eric Dumont

► **To cite this version:**

Eric Dumont. Caractérisation, modélisation et simulation des effets visuels du brouillard pour l'utilisateur de la route. Modélisation et simulation. Université René Descartes - Paris V, 2002. Français. NNT : . tel-00164237

HAL Id: tel-00164237

<https://theses.hal.science/tel-00164237v1>

Submitted on 19 Jul 2007

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.

UNIVERSITE RENE DESCARTES - PARIS V
Centre Universitaire des Saints-Pères
UFR DE MATHEMATIQUES ET INFORMATIQUE

*Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur
de l'Université RENE DESCARTES - PARIS V*

Discipline : Sciences de la Vie et de la Matière

Spécialité : Mathématiques et Informatique

Par : M. Éric DUMONT

Sujet de la thèse :

**Caractérisation, modélisation et simulation
des effets visuels du brouillard
pour l'utilisateur de la route**

Soutenue le 27 novembre 2002, devant le jury composé de :

M. Bernard PÉROCHE	Président
M. Georges STAMON	directeur de thèse
M. Jean LOUCHET	co-directeur de thèse
M. Patrick CALLET	rapporteur
M. Andras KEMENY	rapporteur
M. Jean PEYBERNARD	invité

À mes parents.
À ma compagne et nos enfants.

"Fog is the visible sign of a merging of time tracks."
– Larry Niven, *For a foggy night* (1971)

Remerciements

Ce travail de recherche a été mené au sein du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) à Paris.

Je tiens à remercier tout d'abord la Direction Générale du LCPC, en les personnes de Monsieur J.-F. Coste puis de Monsieur J. Roudier, la Direction Scientifique, en les personnes de Monsieur A. Bonnet puis de Monsieur R. Pochat, le Directeur Technique, Monsieur P.-Y. Texier, et le Chef de la Division Exploitation Signalisation Éclairage (DESE) du LCPC, Monsieur B. Jacob, pour m'avoir autorisé à mener cette thèse.

Je remercie très vivement Monsieur G. Stamon, ainsi que Monsieur J. Louchet, pour avoir accepté de diriger cette thèse et pour leurs précieux conseils.

Je remercie très sincèrement Monsieur P. Callet et Monsieur A. Kemeny, qui ont bien voulu porter leur attention sur ces recherches en assumant la charge de rapporteurs au sein du jury, ainsi que Monsieur B. Péroche, qui a accepté de se joindre à ce jury en tant qu'examinateur.

Je remercie mes collègues des Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées d'Angers, de Clermont-Ferrand et de Rouen, avec qui j'ai eu plaisir à travailler : Alexis Bacelar, Jacques Cariou, Michèle Colomb, Fabrice Fournela, Gilles Legoueix et Vadim Zouboff, avec une pensée pour Jean Ménard.

Je remercie également les membres de l'équipe du Laboratoire d'Énergétique des Systèmes et Procédés de l'Université de Rouen, ceux de l'équipe Vision du Muséum National d'Histoire Naturelle, ainsi que les personnes du Laboratoire de Psychologie de la Conduite et du Centre Informatique et Recherche de l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, et celles de la société Oktal, pour leur apport scientifique pluridisciplinaire.

Je tiens ensuite à remercier Roland Brémond, Chef de la Section Éclairage et Visibilité, ainsi que tous mes collègues et amis de la DESE, et tout particulièrement Giselle Paulmier et Victor Carta pour leur aide précieuse.

Je veux enfin exprimer ma profonde gratitude à Corinne Brusque et à Jean Peybernard pour leur confiance indéfectible et leur soutien constant.

Table des matières

Remerciements	7
Liste des figures	13
Liste des tableaux	15
Introduction	17

PREMIERE PARTIE

1 Caractérisation du brouillard	21
1.1 Aspect microphysique	22
1.1.1 Données météorologiques	22
1.1.2 Microstructure du brouillard	23
1.1.3 Typologie des brouillards naturels	26
1.2 Aspect optique	28
1.2.1 Interaction de la lumière avec une particule	28
1.2.2 Interaction de la lumière avec plusieurs particules	30
1.2.3 Paramètres optiques du brouillard	31
1.3 Aspect perceptif	34
1.3.1 Définitions de la visibilité	35
1.3.2 Les distances de visibilité	35
1.3.3 Visibilité dans le brouillard	37
1.3.4 Typologie des brouillards routiers	37
1.4 Conclusion	37
2 Effets du brouillard sur la vision	39
2.1 Physiologie de la vision	40
2.2 Vision des formes	41
2.2.1 Décomposition fréquentielle de l'environnement visuel	41
2.2.2 Fonction de sensibilité au contraste	42
2.2.3 Impact du brouillard sur la vision des formes	42

2.3	Perception du mouvement	43
2.3.1	Détection d'un objet en mouvement	43
2.3.2	Perception de la vitesse et de la direction de déplacement	45
2.4	Perception des distances	45
2.4.1	Mécanismes de la perception des distances	45
2.4.2	Impact de l'atténuation du contraste	46
2.4.3	Impact du brouillard	46
2.5	Vision des couleurs	46
2.6	Autres effets	47
2.6.1	Les bords flous	47
2.6.2	Les halos	48
2.7	Conclusion	48
3	Milieux diffusants en synthèse d'images	49
3.1	Quelques rappels de radiométrie et de photométrie	50
3.1.1	Radiométrie	50
3.1.2	Photométrie	52
3.1.3	Caractérisation photométrique des éléments d'une scène routière	53
3.2	Le problème de l'éclairage global	54
3.2.1	Image et luminance	54
3.2.2	L'équation de transfert radiatif	55
3.2.3	Méthodes de résolution	55
3.3	Approche de type radiosité	56
3.3.1	Principe de l'algorithme de radiosité	57
3.3.2	Extension aux milieux participants	58
3.3.3	Extension aux matériaux et aux milieux anisotropes	59
3.3.4	Limites et solutions	59
3.4	Approche de type tracé de rayons	60
3.4.1	Principe de l'algorithme de tracé de rayons	60
3.4.2	Extension aux milieux participants	62
3.4.3	Extension aux matériaux et aux milieux anisotropes	63
3.4.4	Limites et solutions	63
3.5	Méthodes hybrides	66
3.5.1	Combinaisons de la radiosité et du tracé de rayons	66
3.5.2	Cartes de photons	66
3.6	Choix d'une méthode de synthèse d'images	67
3.7	Conclusion	67

SECONDE PARTIE

4	Synthèse d'images dans le brouillard par tracé de photons	71
4.1	Propagation de la lumière	72
4.1.1	Prise en compte des propriétés photométriques	72
4.1.2	Émission	74
4.1.3	Libre parcours	74
4.1.4	Diffusion	74
4.1.5	Réflexion	75
4.2	Simulation de mesures photométriques	76
4.2.1	Description des détecteurs	76
4.2.2	Contribution lumineuse des photons	77
4.2.3	Calcul de la luminance	77
4.2.4	Exemple de simulation	78
4.3	Validation du code de simulation	78
4.3.1	Comparaison analytique : réflexion simple	78
4.3.2	Comparaison analytique : réflexions multiples	80
4.3.3	Comparaison avec une technique purement Monte-Carlo	84
4.3.4	Comparaison avec des mesures en brouillard artificiel	86
4.4	Conclusion	88
5	Opérateur fréquentiel de contraste du brouillard	89
5.1	Définitions et propriétés des filtres linéaires	90
5.1.1	Définitions	90
5.1.2	Propriétés	94
5.2	Filtrage fréquentiel du contraste par le brouillard	97
5.2.1	Théorie de la FTM atmosphérique	97
5.2.2	La FTM du brouillard	98
5.3	Propriétés de la FTM du brouillard	99
5.3.1	Recueil des données par simulation	99
5.3.2	Influence des paramètres liés au milieu	105
5.3.3	Influence des paramètres liés au mode de recueil de la FTM	110
5.4	Définition d'un opérateur fréquentiel de contraste	116
5.4.1	Interprétation de la FTM du brouillard	116
5.4.2	Définition de l'Opérateur Fréquentiel de Contraste du brouillard	117
5.5	Conclusion	118
6	Simulation des effets visuels du brouillard	119
6.1	Effets visuels du brouillard	120
6.1.1	Décomposition du signal visuel	120
6.1.2	Décomposition des perturbations engendrées par le brouillard	121
6.2	Modélisation photométrique	125
6.2.1	La théorie de Koschmieder	125

6.2.2	Modèle photométrique étendu	125
6.2.3	Hypothèses et limites du modèle	127
6.3	Simulation par traitement d'images	129
6.3.1	Données d'entrée du modèle	130
6.3.2	Chaîne de traitements	131
6.3.3	Exemple de mise en œuvre	132
6.4	Simulation de conduite par temps de brouillard	134
6.4.1	Enjeux et contraintes de la simulation de conduite	134
6.4.2	Simulation interactive des effets visuels du brouillard	136
6.5	Conclusion	138
Conclusion		139
	Rappel de la problématique	139
	Travail réalisé	140
	Perspectives	141
Bibliographie		143
ANNEXES		
A	Répartition géographique du brouillard en France	155
B	Résultats de simulation	159

Liste des figures

1	Photographie d'un carambolage sur l'autoroute A31	17
1.1	Salles de brouillard artificiel du LRPC de Clermont-Ferrand	25
1.2	Granulométrie du brouillard artificiel du LRPC de Clermont-Ferrand	26
1.3	Modèle granulométrique de brouillard de type loi gamma modifiée	27
1.4	Diffusion de la lumière par une gouttelette d'eau	29
1.5	Variations de la fonction de phase selon la longueur d'onde	32
1.6	Modèles de fonction de phase	34
2.1	Anatomie de l'œil et de la rétine	40
2.2	Contrastes et fréquence spatiales	41
2.3	Décomposition fréquentielle du contraste	42
2.4	Courbes de sensibilité au contraste	43
2.5	Courbe de sensibilité spatio-temporelle au contraste	44
3.1	Ondes électromagnétiques et spectre visible	50
3.2	Illustration de la luminance et de l'intensité	51
3.3	Courbes d'efficacité lumineuse spectrale de l'œil	52
3.4	Paramètres des équations de transfert radiatif	56
3.5	Calcul des facteurs de formes	58
3.6	Illustration des algorithmes de tracé de rayons	65
4.1	Illustration de la méthode d'échantillonnage par importance	73
4.2	Principe de calcul de la contribution lumineuse d'un photon à une caméra	76
4.3	Test de réflexion simple sur une surface lambertienne	79
4.4	Convergence du calcul de luminance en réflexion simple	80
4.5	Test de réflexions multiples au sein d'une sphère creuse	81
4.6	Convergence du calcul de luminance dans le cas des réflexions multiples	83
4.7	Comparaison entre les méthodes Monte-Carlo et semi-Monte-Carlo	85
4.8	Principe de la mesure du halo diffusé autour d'une source en brouillard artificiel	86
4.9	Résultat de la mesure du halo diffusé autour d'une source en brouillard artificiel	87
5.1	Illustration du principe de formation du signal visuel	90
5.2	Amplitude et phase d'un signal sinusoïdal	92

5.3	Exemples de transformées de Fourier	93
5.4	Représentation schématique d'un filtre linéaire	94
5.5	Illustration du phénomène de repliement de spectre	95
5.6	Effet de moiré causé par le repliement de spectre	96
5.7	Représentation schématique d'un système d'imagerie	97
5.8	Fonctions de transfert de modulation calculées analytiquement	99
5.9	Moyennage circulaire de la réponse impulsionnelle	101
5.10	Indexation du capteur 1D pour le recueil de la réponse impulsionnelle	102
5.11	Décomposition du réponse impulsionnelle en fonction de l'angle d'émission	103
5.12	Géométrie utilisée pour l'étude de la FTM du brouillard	104
5.13	Granulométries utilisées pour étudier la FTM du brouillard	106
5.14	Influence de la granulométrie du brouillard sur la FTM	107
5.15	Combinaison linéaire de tranches de brouillard	108
5.16	Amplitude des variations de la FTM simulée en fonction de la densité optique	109
5.17	Influence de la densité optique sur la FTM du brouillard	111
5.18	FTM d'une tranche de brouillard de densité optique unitaire	112
5.19	Influence de l'ouverture angulaire du détecteur sur la FTM du brouillard	113
5.20	Influence de l'ouverture angulaire de la source sur la FTM du brouillard	115
6.1	Zones primaires et secondaires du signal visuel	120
6.2	Effet d'extinction des zones secondaires du signal visuel	122
6.3	Effet de halo autour des zones primaires du signal visuel	122
6.4	Effets de voile atmosphérique et rétrodiffusé	123
6.5	Exemples de distribution de luminance de voile rétrodiffusée	124
6.6	Images de faisceaux lumineux dans le brouillard	128
6.7	Simulation de feux anti-brouillard en brouillard dense	129
6.8	Description 2D½ du signal visuel	130
6.9	Exemple de description 2D½ (scène de rase-campagne)	133
6.10	Exemples de simulation des effets visuels du brouillard	135
6.11	Approximation de la profondeur par la fonction OpenGL FOG	137
6.12	Simulation de conduite par temps de brouillard	138
A.1	Nombre annuel moyen de jours avec brouillard en France	156
A.2	Nombre mensuel moyen de jours avec brouillard en France	157
B.1	Scène routière utilisée pour tester le code de simulation PROF	159
B.2	Cartes d'isoluminance calculées à l'aide du code de simulation PROF	160

Liste des tableaux

1.1	Modèles granulométriques de brouillard	27
4.1	Valeurs numériques des paramètres de simulation pour le cas des réflexions multiples	82
B.1	Cibles lambertiennes éclairées par un projecteur dans le brouillard	161
B.2	Cibles absorbantes éclairées par un projecteur dans le brouillard	162

Introduction

Le brouillard cause chaque année un millier d'accidents de la route particulièrement meurtriers. Les statistiques de l'Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière résumant à elles seules les enjeux du brouillard en matière de sécurité routière : risque d'accident accru de cinquante pour cent, gravité multipliée par deux, proportion de carambolages multipliée par trois. Si d'autres types d'accidents présentent un bilan plus lourd, ceux qui se produisent par temps de brouillard sont particulièrement médiatisés en raison de leur caractère spectaculaire lorsqu'ils se produisent sur autoroute à des périodes de fort trafic, car ils impliquent alors de nombreux véhicules.



FIG. 1 – *Le brouillard augmente le risque et la gravité des accidents de la route.*

Comment lutter contre l'insécurité des usagers de la route par temps de brouillard ? Par la prévention, d'abord, en informant les conducteurs du comportement à adopter lorsqu'ils traversent une zone où la visibilité est fortement réduite. Par la prévision, en développant des modèles météorologiques permettant de prédire précisément le lieu et l'heure où va se former le brouillard dense, afin de pouvoir fournir à court-terme une information routière crédible. Par la détection, également, en mettant au point des détecteurs de brouillard adaptés aux besoins routiers, permettant d'alerter le gestionnaire et l'utilisateur en temps-réel. Par la signalisation et l'éclairage, en concevant des équipements susceptibles d'assurer la qualité de service de l'infrastructure dans le brouillard. Par l'aide à la conduite, enfin, en développant des systèmes embarqués pour assister le conducteur en conditions de visibilité dégradée.

L'évaluation de la qualité de service de l'infrastructure routière en termes de visibilité et de lisibilité fait partie des missions du Réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées. À ce titre, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées étudie depuis plusieurs années l'impact du brouillard sur l'environnement visuel du conducteur, avec l'appui des Équipes de Recherche Associées des Laboratoires Régionaux d'Angers, de Clermont-Ferrand et de Rouen. En effet, il est indispensable de comprendre les mécanismes qui sont à l'origine de la dégradation de la visibilité pour pouvoir proposer des solutions, destinées à la route ou au véhicule, susceptibles de minimiser l'insécurité routière par temps de brouillard. Par ailleurs, l'évaluation de ces solutions passe nécessairement par l'usage de la simulation de conduite, car il est impossible d'étudier le comportement du conducteur en situation réelle de perte de visibilité.

La présente thèse s'inscrit dans ce contexte, et contribue à caractériser les perturbations engendrées par le brouillard dans l'image de l'environnement routier perçue par le conducteur, en vue de les modéliser et de les simuler. Le travail s'articule en deux parties, chacune étant composée de trois chapitres :

- la première partie, largement bibliographique, aborde différentes approches pour caractériser le brouillard, puis passe en revue ses effets psychovisuels, et finit par un état de l'art sur les méthodes de synthèse d'images prenant en compte les milieux diffusants ;
- la deuxième partie commence par décrire le code de simulation de la diffusion de la lumière qui est utilisé, ensuite, pour étudier le filtrage fréquentiel du contraste par le brouillard, et présente finalement un modèle photométrique des effets visuels du brouillard permettant de simuler ces effets sur l'environnement visuel de l'utilisateur de la route.

PREMIERE PARTIE

Chapitre 1

Caractérisation microphysique, optique et perceptive du brouillard

Le dictionnaire¹ donne la définition suivante du mot « brouillard » :

brouillard n.m. (anc. fr. *broue*, brouillard). Amas de gouttelettes d'eau en suspension dans l'air et formant un nuage près du sol, limitant la visibilité au-dessous d'un kilomètre.

Cette définition, structurée en deux parties, aborde respectivement la nature et les effets du brouillard. La première partie décrit un phénomène météorologique qui se présente sous la forme d'une forte concentration de particules dans l'atmosphère, se distinguant de la pluie par le fait que les gouttelettes ne tombent pas, et des nuages par le fait qu'il se forme au niveau du sol ; on note également que les particules en question sont de petite taille et constituées d'eau. La deuxième partie permet de différencier le brouillard de la brume, moins dense, en fixant une limite de visibilité, ce qui n'est pas anodin puisqu'une notion visuelle dépendante de l'observateur est ainsi introduite. Un troisième aspect est implicite dans cette définition : il s'agit du lien entre la nature microphysique et les effets visuels du brouillard, qui fait intervenir l'interaction entre les gouttelettes et la lumière. Cela nous amène donc à considérer le brouillard selon trois points de vue.

Aspect microphysique - Le brouillard est avant tout un phénomène météorologique qui peut être décrit par sa microstructure : taille, forme, composition et concentration des particules.

Aspect optique - Les interactions de la lumière avec ces particules confèrent au milieu dispersé des propriétés optiques : intensité, spectre et direction de la lumière transmise et diffusée.

Aspect perceptif - En diffusant la lumière, ce milieu modifie les informations perçues par un observateur, entraînant certaines perturbations de la visibilité.

Le présent chapitre dresse une liste des paramètres permettant de caractériser le brouillard pour chacun des trois aspects qui viennent d'être identifiés, en indiquant les relations qui permettent de passer de l'un à l'autre.

1. *Petit Larousse illustré*, 1981.

1.1 Aspect microphysique

1.1.1 Données météorologiques

1.1.1.1 Processus de formation du brouillard

Pour que le brouillard se forme, il est nécessaire que l'atmosphère contienne une quantité suffisante de particules hygroscopiques² susceptibles de servir de noyaux de condensation. Le phénomène se déclenche alors lorsque la température de l'air approche du point de rosée³. Ceci peut se produire de deux façons : par diminution de la température et/ou par augmentation de l'humidité. Les brouillards les plus stables sont ceux qui se forment à la suite d'une inversion de température entre l'air et le sol, et parmi ceux-ci, les deux types de brouillard les plus courants sont les suivants⁴ :

- Le brouillard de rayonnement : également appelé brouillard de sol, il est le plus répandu ; il se forme suite à un refroidissement radiatif du sol ; une longue nuit claire, la présence d'une mince couche d'air humide au niveau du sol et une brise légère favorisent son apparition ; les brouillards de ce type peuvent atteindre des hauteurs de 100 à 200 m.
- Le brouillard d'advection : il est la conséquence du refroidissement d'une masse d'air déplacée horizontalement par le vent au-dessus d'une surface de température différente ; de l'air froid peut ainsi être amené à se mélanger avec de l'air chaud et humide en contact avec de l'eau ayant la température convenable ; un vent chaud et humide peut aussi brutalement envahir des zones où la température du sol, nettement plus basse, a permis aux couches d'air en contact avec le sol de se refroidir et de stagner dans les creux du relief ; les brouillards de ce type peuvent s'étendre jusqu'à des hauteurs de quelques centaines de mètres.

On peut également citer deux autres types de brouillard moins répandus :

- le brouillard d'évaporation, qui est produit dans une masse d'air froid et stable par une évaporation rapide à la surface d'une eau chaude sous-jacente ;
- le brouillard de mélange, léger et de courte durée, qui est produit par le mélange de deux masses d'air humides mais non saturées et de températures différentes.

Il en existe d'autres (eg. brouillard givrant), mais leur occurrence implique des conditions atmosphériques relativement rares dans nos latitudes.

Bien qu'il soit pratique de classer les brouillards en fonction des processus physiques à l'origine de la saturation de l'air, il est en réalité difficile d'appliquer une distinction aussi nette. Généralement, plusieurs processus agissent ensemble, et leur importance relative varie au cas par cas, et évolue dans le temps. Les cartes établies par Météo-France, reproduites en annexe A, fournissent une indication de la répartition géographique de l'occurrence du brouillard en France selon la période de l'année [Bes69].

2. Particules microscopiques (poussière, fumée, pollution, etc.) qui servent de support à la condensation des gouttelettes d'eau dans l'atmosphère.

3. Température de l'air à laquelle la vapeur d'eau se condense.

4. *Encyclopaedia Universalis*, 1993.

Pour une description plus complète des mécanismes thermodynamiques qui sont à l'origine de la formation du brouillard (sursaturation de l'air et nucléation de l'eau), on se référera utilement à la synthèse bibliographique de Paulmier [Pau93] sur les brouillards naturels.

1.1.1.2 Dissipation du brouillard

La plupart du temps, le brouillard se dissipe durant le lever du jour, principalement en raison du réchauffement du sol par le rayonnement solaire. La dissipation a alors lieu de bas en haut, et le brouillard finit souvent par se transformer en nuage. Il arrive également que la chaleur du soleil ne soit pas suffisante. Dans ce cas, seul un vent fort peut disperser le brouillard.

Il existe aussi des procédés permettant de provoquer artificiellement la dissipation du brouillard. La méthode consiste à transformer les gouttelettes de brouillard en flocons ou en gouttes de pluie en répandant des cristaux de glace ou de sel, selon la température, afin de déclencher leur précipitation. En raison de leur coût et de la logistique qu'elles nécessitent, ces techniques sont utilisées exclusivement par de grands aéroports, et il n'est pas envisageable de les mettre en œuvre sur un réseau routier. De plus, même les plus efficaces parmi ces méthodes ne fonctionnent que dans certaines conditions, et n'empêchent pas le brouillard de se reformer un peu plus tard.

1.1.2 Microstructure du brouillard

Des particules de natures variées peuvent coexister dans les milieux dispersés (constitués d'éléments solides ou liquides en suspension). Elles sont en général caractérisées par leurs concentrations, leurs formes, leurs orientations, leurs tailles ainsi que leurs structures et leurs compositions chimiques. Pour une revue détaillée de la constitution granulométrique des milieux diffusants, on peut se référer à l'ouvrage que Kokhanovsky a consacré à ce sujet [Kok99].

Lors de la formation du brouillard, l'humidité se condense en gouttelettes autour de noyaux de condensation. Il faut toutefois noter que tous les noyaux de condensation ne sont pas actifs, et certains d'entre eux peuvent cohabiter dans le brouillard avec les gouttelettes d'eau. Ces particules, de rayon inférieur au micron, sont difficilement mesurables. Néanmoins, il est couramment admis que leur influence sur la propagation de la lumière est négligeable par rapport à celle des particules de taille plus conséquente, ce qui permet de considérer que le brouillard est simplement constitué d'un ensemble de gouttelettes d'eau sphériques en différentes concentrations selon leurs tailles [TL75, SF79, Kon97].

1.1.2.1 Distribution granulométrique du brouillard

La distribution granulométrique $n(r)$ caractérise ainsi la microstructure du brouillard. Elle indique le nombre n de particules dont le rayon est compris entre r et $r + dr$, par unité de volume. Elle est habituellement utilisée sous forme normalisée, par la condition suivante :

$$\int_0^{\infty} n(r) dr = 1 \quad (1.1)$$

Il est important de ne pas confondre la distribution du nombre de particules avec les distributions surfaciques ($4\pi r^2 n(r)$) ou volumiques ($\frac{4}{3}\pi r^3 n(r)$) également utilisées pour caractériser la microstructure des aérosols, au risque de commettre des erreurs d'interprétation.

La distribution du nombre de gouttelettes par classe de rayon présente généralement une forme unimodale [Hus76], caractérisée par le rayon de mode r_m . En outre, le rayon moyen \bar{r} , le rayon effectif r_e , et l'écart-type σ sont des paramètres couramment utilisés comme indicateurs de la granulométrie.

$$\bar{r} = \int_0^{\infty} r n(r) dr \quad (1.2a)$$

$$r_e = \frac{\int_0^{\infty} r^3 n(r) dr}{\int_0^{\infty} r^2 n(r) dr} \quad (1.2b)$$

$$\sigma = \sqrt{\int_0^{\infty} (r - \bar{r})^2 n(r) dr} \quad (1.2c)$$

En effet, comme le rapporte Kokhanovsky [Kok99], des milieux dispersés présentant des distributions granulométriques différentes mais des rayons effectifs et des coefficients de variance identiques engendrent approximativement les mêmes effets optiques.

1.1.2.2 Granulométrie du brouillard naturel

Théoriquement, le brouillard est classé avec les nuages dans les aérosols contenant des particules dont le diamètre est compris entre 2 et $50 \mu\text{m}$ [Hus76]. En pratique, il est difficile de généraliser sur la microstructure des brouillards naturels, car elle dépend de leur mode de formation et de leur stade d'évolution. De plus, les appareils utilisés pour mesurer la distribution granulométrique ne détectent généralement que les particules de diamètre supérieur au micron, et peuvent biaiser le comptage des particules de taille importante en raison de leur faible concentration.

Shettle et Fenn [SF79] font toutefois référence à une campagne de mesures qui aurait permis de rassembler des données représentatives. D'après ces résultats, le brouillard en formation serait caractérisé par des concentrations de 100 à 200 particules par cm^3 , et des rayons distribués entre 1 et $10 \mu\text{m}$ avec des modes de 2 à $4 \mu\text{m}$; lorsque l'opacité augmente, la concentration diminuerait jusqu'à moins de 2 particules par cm^3 , et le rayon de mode augmenterait jusqu'à entre 6 et $12 \mu\text{m}$. Les gouttelettes de moins de $3 \mu\text{m}$ de rayon ont rarement pu être observées en brouillard naturel, en dehors de la phase de formation. Les données expérimentales rapportées par Paulmier [Pau93] ainsi que les mesures microphysiques plus récentes rapportées par Guédalia et Bergot [GB92], semblent en accord avec ces conclusions.

1.1.2.3 Granulométrie du brouillard artificiel

Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand dispose d'installations permettant de générer du brouillard artificiel (figure 1.1). Le procédé de production du brouillard consiste à pulvériser de l'eau sous pression à partir de rampes d'injecteurs suspendues au plafond. La qualification dont a fait l'objet cet équipement a permis d'établir un mode

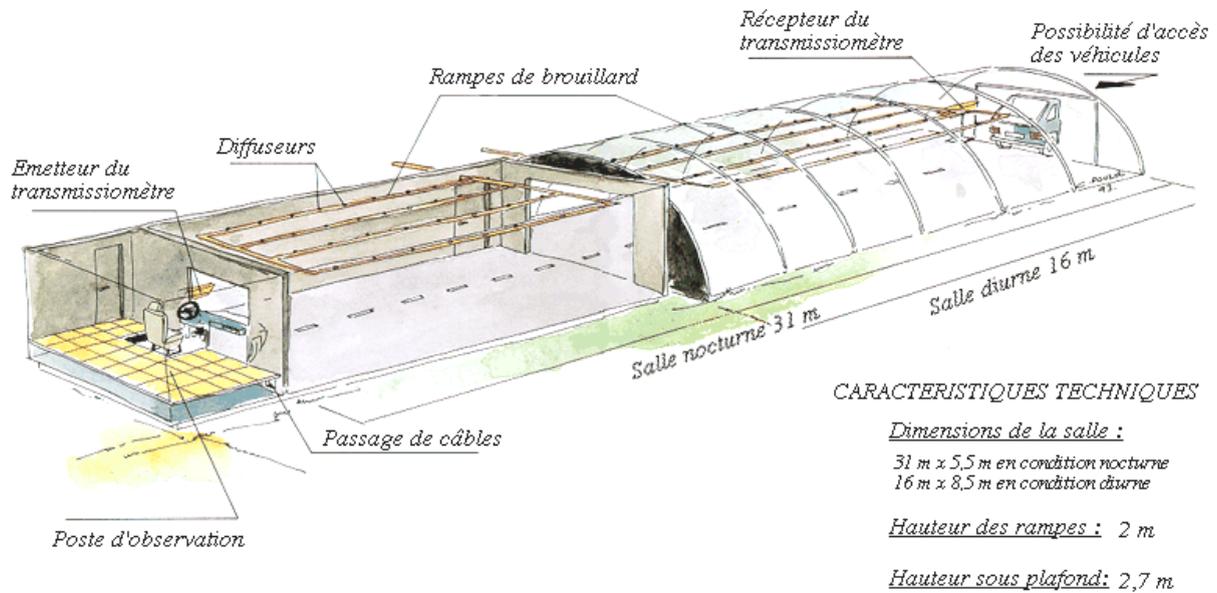


FIG. 1.1 – Caractéristiques techniques des salles de brouillard artificiel du LRPC de Clermont-Ferrand.

de distribution granulométrique de l'ordre du micron de diamètre [Sér97], quelle que soit la concentration. Des études ultérieures ont permis de montrer qu'il était possible de produire des gouttelettes de taille supérieure, en agissant sur la pression d'injection ou la minéralisation de l'eau ; mais la sédimentation fait rapidement disparaître ces grosses gouttelettes. Des exemples de mesures granulométriques sont présentées dans la figure 1.2.

Il existe d'autres techniques pour produire artificiellement du brouillard. Ainsi, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment de Nantes dispose d'une chambre climatique dans laquelle il est possible de produire du brouillard artificiel selon le principe naturel de formation du brouillard de mélange : de l'air humide et chaud est injecté dans une salle où un courant d'air froid est généré par une soufflerie. La maîtrise thermodynamique des installations, non qualifiées à ce jour, permet théoriquement de stabiliser le brouillard, voire d'en contrôler la densité.

On peut également citer le brouillard artificiel utilisé par Nameda [Nam92] pour étudier le filtrage du contraste. Il est généré dans une chambre de grandes dimensions par injection de vapeur d'eau chaude à haut débit. La distribution granulométrique du brouillard stabilisé ainsi produit fait état de gouttelettes de taille importante, atteignant $60 \mu\text{m}$ de diamètre avec un mode à $20 \mu\text{m}$.

Mais ces techniques de production de brouillard artificiel nécessitent une enceinte fermée et une isolation thermique raisonnable. L'expérience des pistes du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Rouen a prouvé que la production de brouillard artificiel en extérieur rendait les expérimentations encore plus difficiles : le brouillard a notamment une fâcheuse tendance à s'évaporer au soleil, ou à se déplacer au gré du vent.

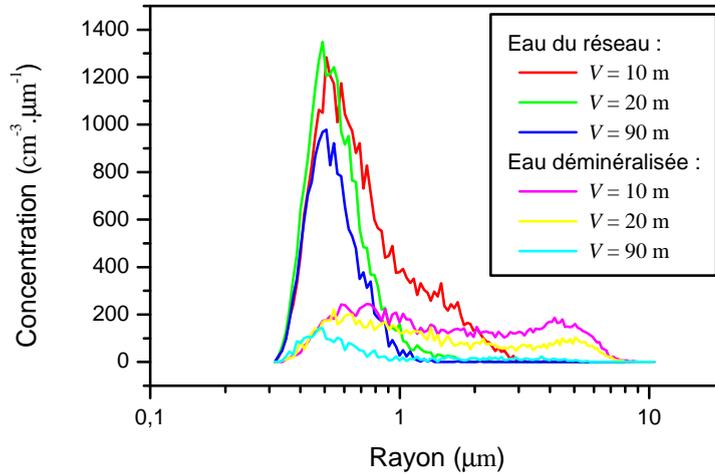


FIG. 1.2 – Exemples d'évolution de la distribution granulométrique (mesurée avec un appareil Polytec) du brouillard artificiel produit au LRPC de Clermont-Ferrand durant la phase de dissipation qui suit l'injection d'eau [Sér97]. V est la visibilité météorologique mesurée par transmissiomètre.

1.1.2.4 Modèles granulométriques

La plupart des études abordant la propagation de la lumière en milieu diffusant se basent sur des modèles granulométriques [Kon97, VDK90, DWT⁺94], une des raisons invoquées étant l'extrême difficulté du recueil de données expérimentales. Parmi les différentes lois utilisées pour modéliser la distribution granulométrique d'un milieu polydispersé naturel [Hus76, DWT⁺94], la distribution gamma modifiée proposée par Deirmendjian [Dei69] est la plus largement appliquée au brouillard [TL75, Kon97, Kok99] :

$$n(r) = a r^\alpha e^{-br^\gamma} \quad (1.3)$$

où $n(r)$ est le nombre de particules par classe de rayon et a , α , b et γ sont des paramètres utilisés pour caler le modèle sur des observations. Shettle et Fenn [SF79] ont ainsi proposé une typologie des différents types de brouillard en quatre classes pour lesquelles ils indiquent des valeurs pour les paramètres de l'équation (1.3). Ces valeurs sont rapportées dans le tableau 1.1, et les distributions granulométriques correspondantes sont tracées dans la figure 1.3.

1.1.3 Typologie des brouillards naturels

En se basant sur les caractéristiques microphysiques des brouillards naturels, il semble donc opportun et commun de définir deux classes de brouillard :

- le brouillard de type advection, constitué de « grosses gouttellettes », avec des diamètres distribués autour d'un mode compris entre 10 et 20 μm ;

Brouillard	Modèle	a	α	b	γ	r_m (μm)	N (cm^{-3})
Advection	1	0,027	3	0,3	1	10,0	20
	2	0,065 92	3	0,375	1	8,0	20
Rayonnement	3	2,373 05	6	1,5	1	4,0	100
	4	607,5	6	3,0	1	2,0	200

TAB. 1.1 – Paramètres de la loi gamma modifiée (1.3) rapportés par Shettle et Fenn [SF79] pour représenter les distributions granulométriques du brouillard naturel (r_m est le rayon de mode, N est la concentration totale des particules).

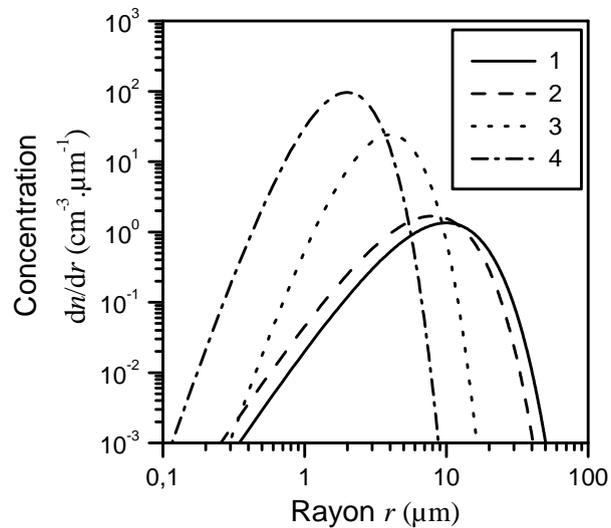


FIG. 1.3 – Modèles granulométriques de brouillard de type loi gamma modifiée proposés par Shettle et Fenn [SF79].

- le brouillard de type rayonnement, constitué de « petites gouttelettes », avec des diamètres distribués autour d'un mode compris entre 1 et 10 μm .

Il faut toutefois noter l'aspect théorique de cette typologie, étant donné que le rayonnement et l'advection sont susceptibles d'intervenir ensemble dans la formation des brouillards naturels, même si l'un des deux phénomènes est généralement prépondérant.

Si l'on considère que les particules de plus gros diamètre sont les dernières à se former durant la condensation, et qu'elles sont les premières à disparaître par sédimentation du fait de leur poids, on peut être amené à penser que la taille des gouttelettes est liée à la densité du brouillard. Toutefois, Shettle et Fenn précisent que leurs modèles de brouillard sont représentatifs de toute la gamme de densités (visibilité allant de 50 m à plus de 1 km), et qu'il est possible de les mettre à l'échelle voulue en jouant sur la concentration totale [SF79].

1.2 Aspect optique

1.2.1 Interaction de la lumière avec une particule

La lumière visible correspond à une combinaison de rayonnements électromagnétiques monochromatiques dont les longueurs d'onde sont comprises entre 380 et 780 nm. Lorsqu'elles traversent le brouillard, ces ondes électromagnétiques interagissent avec les particules en suspension dans l'air. Leur énergie se trouve atténuée à chacune de ces interactions, par un phénomène appelé l'extinction, qui désigne en fait deux phénomènes :

- l'absorption, par laquelle une partie de l'énergie lumineuse se trouve convertie en énergie calorifique ;
- la diffusion, par laquelle une partie de l'énergie lumineuse se trouve dispersée dans des directions différentes de la direction de propagation de l'onde incidente.

1.2.1.1 Paramètres influents : taille et longueur d'onde

L'importance relative de l'absorption dans l'extinction dépend de la nature chimique de la particule, par l'intermédiaire de l'indice de réfraction $m(\lambda)$ du matériau dont elle est constituée, indice qui dépend de la longueur d'onde λ . Dans le cas du brouillard, constitué de gouttelettes d'eau, l'indice de réfraction $m(\lambda)$ peut être considéré comme constant et égal à 1,33 pour la lumière visible.

Le rayon r de la sphère circonscrite à la particule influe quant-à lui sur la répartition spatiale de l'énergie diffusée. Selon le rapport entre la taille de la particule et la longueur d'onde du rayonnement, deux types de diffusion sont distingués.

- La diffusion de Rayleigh est due aux molécules de gaz. Ce cas correspond à la limite quand la longueur d'onde est beaucoup plus grande que la taille des particules ($r < \lambda/10$). L'énergie de l'onde lumineuse diffusée est alors proportionnelle à la puissance quatrième de la longueur d'onde. Dans le brouillard, ce type de diffusion est négligeable [Hus76].
- La diffusion de Mie concerne les particules plus grandes (notamment les gouttelettes d'eau). La répartition spatiale de l'énergie diffusée dépend alors fortement de l'indice

de réfraction $m(\lambda)$ de la particule et de son paramètre de taille x :

$$x = 2\pi r/\lambda \quad (1.4)$$

1.2.1.2 Théorie électromagnétique de Mie

L'importance de l'extinction est proportionnelle à la section de l'espace dans lequel l'onde interagit avec la particule. Cette surface $C_{\text{ext}}(r)$, appelée section efficace d'extinction, est liée à la section πr^2 de la particule par l'intermédiaire du coefficient $Q_{\text{ext}}(r)$ appelé efficacité d'extinction :

$$C_{\text{ext}}(r) = Q_{\text{ext}}(r) \pi r^2 \quad (1.5)$$

On définit de manière équivalente l'efficacité de diffusion, $Q_{\text{dif}}(r)$, pour caractériser la diffusion indépendamment de l'absorption.

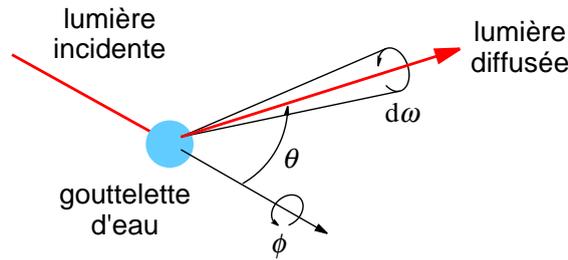


FIG. 1.4 – Diffusion de la lumière par une gouttelette d'eau.

Le rayonnement diffusé par la particule est caractérisé par son intensité, c'est-à-dire le flux énergétique par unité d'angle solide dans la direction de propagation. L'intensité diffusée dépend donc de la direction de diffusion, définie par les angles θ et ϕ relativement à la direction de l'onde incidente, comme illustré en figure 1.4. La distribution spatiale de l'intensité diffusée est décrite par le diagramme de diffusion, plus communément appelé la fonction de phase dans sa forme normalisée, et notée $P(\theta, \phi)$. Lorsqu'on considère une particule sphérique comme les gouttelettes du brouillard, la diffusion est symétrique de révolution autour de la direction de l'onde incidente, et l'angle θ suffit seul pour décrire les variations de la fonction de phase. Il est courant d'exprimer la fonction de phase en fonction du cosinus de l'angle de diffusion :

$$\mu = \cos \theta \quad (1.6)$$

Partant de l'équation de Maxwell pour les ondes électromagnétiques, Lorenz a exprimé les efficacités d'extinction $Q_{\text{ext}}(r)$ et de diffusion $Q_{\text{dif}}(r)$ d'une sphère transparente de rayon r , et l'intensité de la lumière diffusée par cette particule lorsqu'elle reçoit une onde lumineuse monochromatique plane de flux unitaire et de longueur d'onde λ . Sa solution a plus tard été généralisée indépendamment par Mie (dont le nom a seul été retenu) et par Debye. Les formules qui en résultent sont les suivantes [Hul81]⁵ :

$$Q_{\text{ext}}(r) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \Re(a_n + b_n) \quad (1.7a)$$

5. $\Re(z)$ représente la partie réelle du nombre complexe z .

$$Q_{\text{dif}}(r) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (1.7b)$$

$$S_1(\mu) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\mu) + b_n \tau_n(\mu)] \quad (1.7c)$$

$$S_2(\mu) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\mu) + b_n \pi_n(\mu)] \quad (1.7d)$$

S_1 et S_2 sont les amplitudes complexes de diffusion dans les deux directions incidentes orthogonales de polarisation. L'intensité diffusée est proportionnelle à la fonction de phase :

$$P(r, \mu) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2} (|S_1(\mu)|^2 + |S_2(\mu)|^2) \quad (1.8)$$

Les coefficients de Mie a_n et b_n , à valeurs complexes, dépendent du paramètre de taille et de l'indice de réfraction ; ils sont exprimés en termes de fonctions primaires et secondaires de Ricatti-Bessel et de leurs dérivées. Les fonctions τ_n et π_n sont exprimées en termes de polynômes de Legendre et de leurs dérivées. Le nombre approximatif de termes de ces séries qu'il faut évaluer pour obtenir un résultat précis est de l'ordre du paramètre de taille x de la particule considérée [Wis80]. Les équations exactes permettant de calculer ces coefficients sont décrites en détails dans la note technique de Wiscombe [Wis79].

1.2.2 Interaction de la lumière avec plusieurs particules

1.2.2.1 Milieu monodispersé

L'extinction est proportionnelle à la concentration des particules dans l'espace traversé par le rayonnement. L'importance du phénomène au sein d'un milieu monodispersé, constitué de N particules de rayon r par unité de volume, est quantifiée par le coefficient d'extinction $K_{\text{ext}}(r)$, qui décrit l'atténuation de l'énergie lumineuse par unité de longueur :

$$K_{\text{ext}}(r) = NC_{\text{ext}}(r) = \pi Q_{\text{ext}}(r)r^2 \quad (1.9)$$

On définit de manière équivalente le coefficient de diffusion $K_{\text{dif}}(r)$.

1.2.2.2 Milieu polydispersé

Pour caractériser un milieu polydispersé, il est possible de considérer un milieu monodispersé « équivalent », constitué de particules de taille unique lui conférant des propriétés d'extinction et de diffusion équivalentes à celle du milieu réel. Les coefficients d'extinction et de diffusion de ce milieu peuvent être calculés en convoluant les sections efficaces d'extinction et de diffusion par la distribution granulométrique $n(r)$:

$$K_{\text{ext}} = \pi N \int_0^{\infty} Q_{\text{ext}}(r) n(r) r^2 dr \quad (1.10a)$$

$$K_{\text{dif}} = \pi N \int_0^{\infty} Q_{\text{dif}}(r) n(r) r^2 dr \quad (1.10b)$$

Il est également possible de calculer une fonction de phase équivalente :

$$P(\mu) = \pi N \int_0^\infty Q_{\text{ext}}(r) P(r, \mu) n(r) r^2 dr \quad (1.11)$$

1.2.3 Paramètres optiques du brouillard

1.2.3.1 Coefficient d'extinction

Ainsi, lors de son trajet entre deux points d'un milieu dispersé, une onde lumineuse monochromatique subit une extinction du fait de la présence des particules qui absorbent et diffusent son énergie. La transmissivité T , c'est-à-dire la proportion d'énergie lumineuse transmise sur une distance d , est donnée par la loi de Beer-Lambert :

$$T = e^{-K_{\text{ext}} d} \quad (1.12)$$

où K_{ext} est le coefficient d'extinction du milieu, exprimé en m^{-1} .

La part relative de la diffusion dans ce phénomène d'extinction est représentée par l'albédo a :

$$a = \frac{K_{\text{dif}}}{K_{\text{ext}}} \quad (1.13)$$

Dans le cas du brouillard, où l'on considère que les particules diffusantes sont purement constituées d'eau, les équations de Mie donnent un albédo très proche de l'unité dans le spectre visible, ce qui revient à dire que la proportion d'énergie absorbée est négligeable, et que l'extinction est uniquement due à la diffusion. Le coefficient d'extinction, qu'on note simplement K , suffit alors à caractériser le pouvoir d'extinction du brouillard :

$$K = K_{\text{ext}} \simeq K_{\text{dif}} \quad (1.14)$$

L'inverse du coefficient d'extinction représente le libre parcours moyen, qui correspond à la longueur moyenne du trajet que peut parcourir librement l'onde lumineuse dans le brouillard entre deux gouttelettes d'eau.

Il arrive également qu'on utilise la densité optique τ pour caractériser l'extinction sur une distance donnée d :

$$\tau = Kd \quad (1.15)$$

1.2.3.2 Fonction de phase

Dans le spectre du visible et pour les tailles de gouttelettes du brouillard, la diffusion de Mie varie peu avec la longueur d'onde, comme on peut le vérifier dans les exemples de la figure 1.5. Il est donc raisonnable de généraliser à tout le spectre visible les propriétés optiques du brouillard calculées pour la longueur d'onde de 550 nm, qui correspond au maximum de sensibilité du système visuel humain en conditions diurnes.

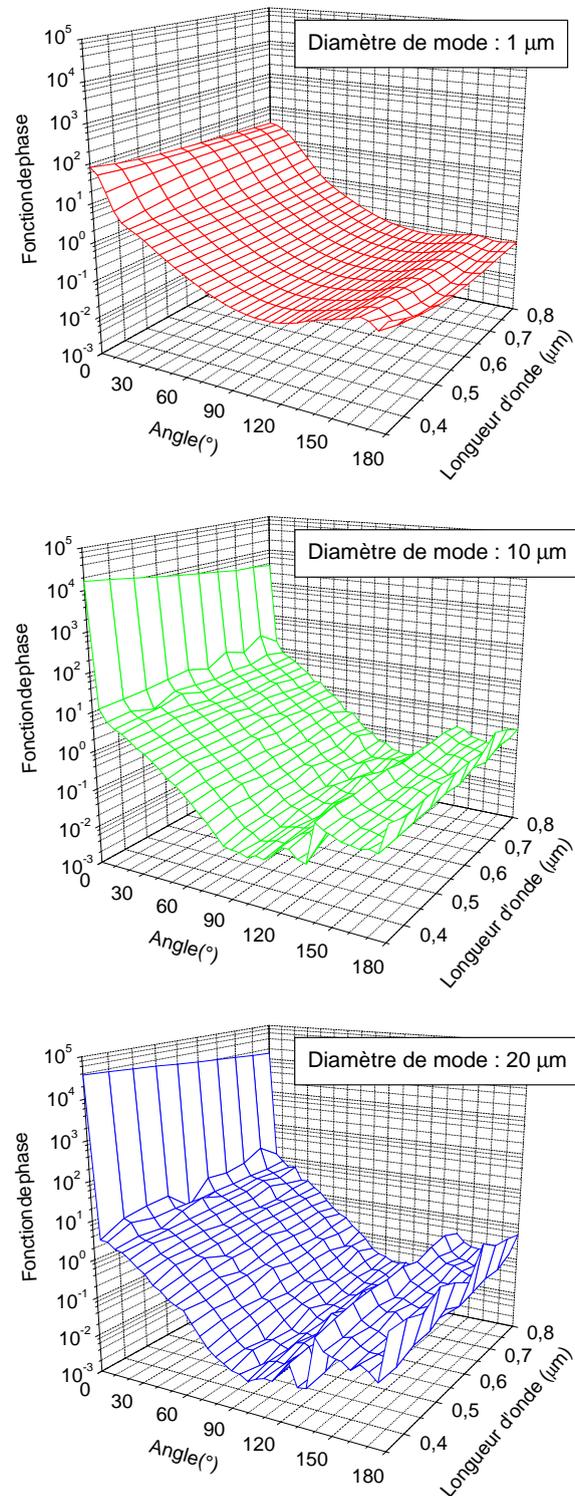


FIG. 1.5 – Exemples d'évolution de la fonction de phase en fonction de la longueur d'onde, calculés à l'aide des équations de Mie pour différentes granulométries de brouillard.

La mise en œuvre des équations de Mie étant relativement ardue, la fonction de phase est couramment approximée sous la forme d'expressions analytiques [Gla95]. Ainsi, Nishita distingue les milieux « brumeux » (*hazy*) et « troubles » (*murky*), et utilise les approximations suivantes [BSS93] :

$$P_{\text{hazy}}(\mu) = \frac{1}{2} + \frac{9}{2} \left(\frac{1 + \mu}{2} \right)^8 \quad (1.16a)$$

$$P_{\text{murky}}(\mu) = \frac{1}{2} + \frac{33}{2} \left(\frac{1 + \mu}{2} \right)^{32} \quad (1.16b)$$

Le modèle analytique de fonction de phase proposé par Henyey et Greenstein est l'un des plus utilisés [DJC95] (bien qu'il ait été initialement destiné à la caractérisation des particules interstellaires [HG41]) :

$$P_{\text{HG}}(\mu, g) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g\mu)^{3/2}} \quad (1.17)$$

Cette fonction est paramétrée par le facteur d'asymétrie $g \in]-1, 1[$:

$$g = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 P(\mu) \mu \, d\mu \quad (1.18)$$

Les variations de ce facteur permettent de décrire différents comportements diffusants : lorsque g tend vers 1, la diffusion vers l'avant devient prépondérante ; lorsque g tend vers -1 , c'est la rétrodiffusion qui devient plus importante ; on obtient une diffusion isotrope en choisissant $g = 0$. Une forme analytique plus simple de la fonction de Henyey-Greenstein a été proposée par Schlick [BSS93] :

$$P_{\text{S}}(\mu, k) = \frac{1 - k^2}{(1 - k\mu)^2} \quad (1.19)$$

dans laquelle le facteur k est équivalent au facteur d'asymétrie g défini par l'équation (1.18). De plus, Schlick a montré qu'il était possible de produire des formes équivalentes à celles des équations (1.16) ou (1.17) par une somme normalisée de deux de ses fonctions de phase :

$$P_{2\text{S}}(\mu, \alpha, k, k') = \alpha P_{\text{S}}(\mu, k) + (1 - \alpha) P_{\text{S}}(\mu, k') \quad (1.20)$$

avec $(\alpha, k, k') \in [0, 1] \times]-1, 1[^2$

Cornette et Shanks [CS92] ont proposé une expression analytique de la fonction de phase qui est proche de celle de Henyey-Greenstein, mais plus réaliste physiquement, et qui nécessite moins de paramètres que la combinaison linéaire (1.20) :

$$P_{\text{CS}}(\mu, g) = \frac{3}{2} \frac{1 - g^2}{2 + g^2} \frac{1 + \mu^2}{(1 + g^2 - 2g\mu)^{3/2}} \quad (1.21)$$

La figure 1.6 illustre les limites de ces différents modèles. À facteur d'asymétrie égal, on peut constater qu'aucune des expressions analytiques proposées ne permet de rendre compte de la forme de la fonction de phase de Mie calculée à partir d'une distribution granulométrique

donnée. De manière générale, les modèles tendent à sous-estimer la rétrodiffusion, et à surestimer la diffusion dans les angles intermédiaires, autour de 90° . Mais le principal problème est qu'aucun modèle ne permet de restituer le « pic » de diffusion avant, dû à la diffraction, de manière satisfaisante. En conclusion, il est préférable d'utiliser la fonction de phase calculée à partir de la granulométrie avec les équations de Mie : (1.7) et (1.8).

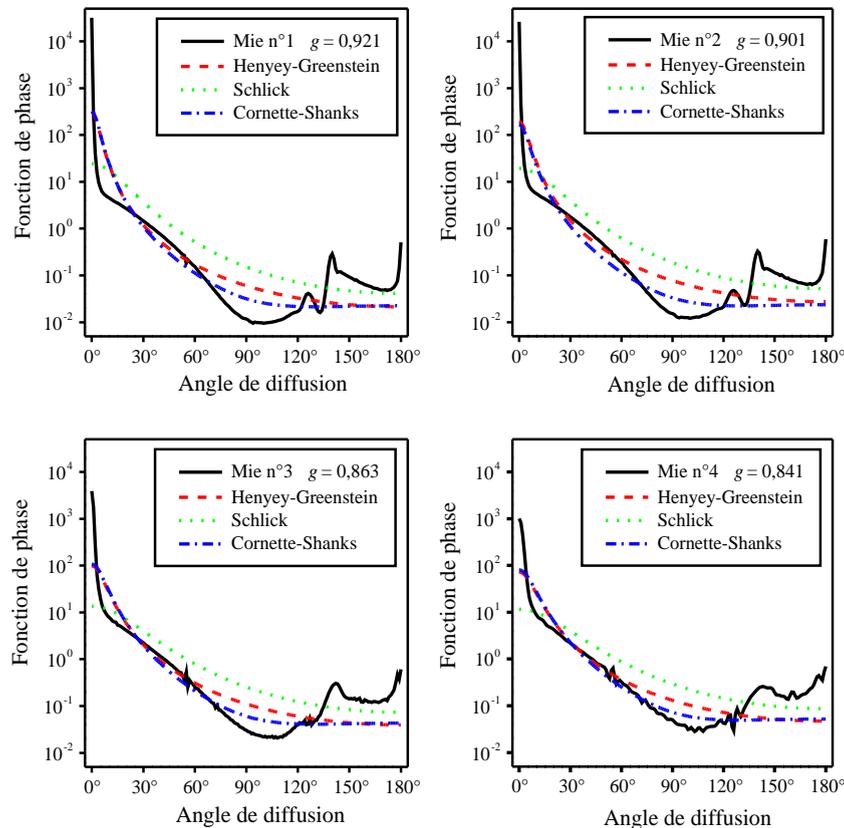


FIG. 1.6 – Comparaison entre la fonction de phase de Mie (calculée à partir des 4 modèles granulométriques de brouillard de Shettle et Fenn [SF79]) et différents modèles analytiques, pour une longueur d'onde de 550 nm.

1.3 Aspect perceptif

L'environnement au sein duquel évolue un observateur émet des rayonnements lumineux qui sont détectés par les yeux et permettent au système visuel de former une image. Or la présence de brouillard perturbe la propagation de la lumière, la soumettant à de multiples diffusions. Il s'en suit une profonde modification du signal visuel, et par conséquent une perte de visibilité.

1.3.1 Définitions de la visibilité

Si l'on se réfère encore une fois au dictionnaire⁶, la visibilité est « la qualité, le caractère de ce qui est visible, discernable », et donc « de ce qui peut être vu, reconnu ». Selon cette définition, la visibilité est qualificative de ce que l'on regarde.

Un autre dictionnaire⁷ donne une définition plus spécifique, et plus adaptée à notre contexte : « qualité de l'atmosphère, permettant de voir à une plus ou moins grande distance ». Selon cette autre définition, la visibilité est qualificative de l'atmosphère à travers laquelle est faite l'observation.

Ainsi, la notion de visibilité dépend à la fois de la nature de l'objet observé (lumineux ou sombre, ponctuel ou étendu), et de l'atmosphère qui sépare cet objet de l'observateur. De plus, il est possible de la quantifier sous la forme d'une distance, ce qui explique qu'on parlera indifféremment de visibilité et de distance de visibilité.

Dans le vocabulaire international de l'éclairage [CIE87], la notion courante de visibilité est prise au sens météorologique : « la plus grande distance à laquelle un objet noir de dimensions convenables peut être reconnu de jour sur le ciel à l'horizon ». Bien entendu, le terme « convenable » laisse libre cours à l'interprétation. Dans un rapport préliminaire pour la CIE sur la vision de la signalisation en atmosphère perturbée, Blaise [Bla81] utilise un diamètre apparent de 3' (ce qui équivaut à un disque de moins de 10 cm de diamètre observé à une distance de 100 m) ; Météo France [GM92] considère des diamètres angulaires compris entre 0,5° et 5° (ce qui équivaut à un disque de 1 à 8 m de diamètre vu à 100 m). Quoi qu'il en soit, la définition météorologique est basée sur des hypothèses trop restrictives pour être vraiment applicable en pratique.

1.3.2 Les distances de visibilité

En pratique, la visibilité (météorologique) est définie comme la plus grande distance à laquelle il est possible de voir et d'identifier à l'œil nu un objet étendu sur le ciel à l'horizon de jour, et une source lumineuse diffuse d'intensité modérée de nuit.

La distinction des conditions diurnes et nocturnes conduit à l'utilisation de deux distances de visibilité. Dans le vocabulaire international de l'éclairage [CIE87], la « portée visuelle » est utilisée de jour, et la « portée lumineuse » est utilisée de nuit. Une troisième distance de visibilité est également introduite, la « portée optique météorologique », qui permet de faire le lien entre les deux précédentes et qui a été choisie pour définir la visibilité dans la terminologie de la météorologie routière [NFP98].

1.3.2.1 La portée visuelle

La portée visuelle est la distance à laquelle un objet donné peut être reconnu dans des conditions déterminées, avec les seules limitations de la transmissivité atmosphérique et du seuil de contraste [CIE87]. Elle est utilisée comme distance de visibilité de jour, car elle correspond à

6. *Petit Larousse illustré*, 1981.

7. *Le Petit Robert 1*, 1992

l'atténuation atmosphérique du contraste C entre l'objet, de luminance L , et le fond sur lequel il se détache, de luminance L_f :

$$C = \frac{L - L_f}{L_f} \quad (1.22)$$

On peut la mettre en relation avec la loi de Koschmieder, qui relie le contraste apparent C d'un objet observé sur le ciel à l'horizon, à une distance d'observation donnée d , au contraste C_0 de cet objet lorsqu'il est observé à courte distance, et au coefficient d'extinction atmosphérique K que l'on suppose uniforme :

$$C = C_0 e^{-Kd} \quad (1.23)$$

1.3.2.2 La portée lumineuse

La portée lumineuse est la distance la plus grande à laquelle un feu donné peut être reconnu dans des conditions d'observation déterminées, avec les seules limitations de la transmissivité atmosphérique et du seuil d'éclairement sur l'œil de l'observateur [CIE87]. Elle est utilisée comme distance de visibilité de nuit, car elle correspond à l'atténuation atmosphérique du flux lumineux.

On peut la mettre en relation avec la loi d'Allard, qui donne l'éclairement lumineux E produit sur une surface par une source lumineuse en fonction de l'intensité lumineuse I de la source dans la direction de la surface, de la distance d entre la surface et la source et du coefficient d'extinction atmosphérique K que l'on suppose uniforme ; la surface est normale à la direction de la source et celle-ci est suffisamment éloignée pour qu'on puisse la considérer comme une source ponctuelle :

$$E = \frac{I}{d^2} e^{-Kd} \quad (1.24)$$

1.3.2.3 La portée optique météorologique

La portée optique météorologique V est la longueur d'un trajet dans l'atmosphère sur lequel le flux lumineux d'un faisceau quasi parallèle de rayonnement, émanant d'une source lumineuse de température de couleur 2700 K, est réduit de 95% [CIE87].

La valeur de l'atténuation a été choisie de telle sorte que ce terme conduise à une mesure approximative de la visibilité (météorologique) définie précédemment, pour un seuil de contraste C_s fixé arbitrairement à 5%, quoique les anglo-saxons utilisent plutôt un seuil de 2%. C'est la raison pour laquelle la notation V a été attribuée à ce paramètre.

La portée optique météorologique est reliée au coefficient d'extinction atmosphérique K , que l'on suppose uniforme, par la formule suivante :

$$e^{-KV} = C_s \quad (1.25)$$

qui s'écrit plus couramment, pour un seuil de contraste de 5% :

$$V \simeq \frac{3}{K} \quad (1.26)$$

1.3.3 Visibilité dans le brouillard

Les définitions précédentes s'appliquent dans n'importe quelles conditions atmosphériques. Dans le cas du brouillard, la distance de visibilité est même le paramètre descriptif le plus communément employé. Ainsi, il n'est pas rare d'entendre, lorsque la radio annonce la présence de brouillard, que la visibilité est réduite à moins de 100 m, voire 50 m.

Cette information est fournie sur le terrain par des visibilimètres, de type transmissiomètre ou diffusiomètre [PA84]. Le premier appareil permet de mesurer la transmissivité du milieu, et d'en déduire le coefficient d'extinction, connaissant la base de mesure ; coûteux et malaisé à mettre en œuvre, son usage est généralement réservé aux aéroports. Le deuxième se base sur la proportion d'énergie lumineuse diffusée dans une direction particulière, vers l'avant ou vers l'arrière (rétrodiffusiomètre), pour calculer le coefficient d'extinction ; ce type d'appareil est meilleur marché et plus facile à mettre en œuvre, mais en contre-partie il offre une moindre précision. Dans les deux cas, la formule (1.26) est ensuite utilisée pour fournir une estimation de la distance de visibilité.

Il existe également différentes techniques de mesure permettant d'évaluer directement la visibilité par traitement d'images issues de caméras numériques [DDL, GM92, BD98], mais elles ne sont pas exploitées sur le terrain de manière opérationnelle, pour des raisons de fiabilité.

1.3.4 Typologie des brouillards routiers

La norme française NF P 99-320 [NFP98], en application depuis avril 1998, fixe la terminologie à appliquer dans le domaine de la météorologie routière. Elle définit le brouillard routier comme un brouillard particulièrement dense, réduisant la visibilité horizontale à moins de 400 m. Elle définit également quatre classes de visibilité, applicables au brouillard :

- classe 1 pour une distance de visibilité comprise entre 200 et 400 m,
- classe 2 pour une distance de visibilité comprise entre 100 et 200 m,
- classe 3 pour une distance de visibilité comprise entre 50 et 100 m,
- classe 4 pour une distance de visibilité inférieure à 50 m.

1.4 Conclusion

Parmi les trois aspects du brouillard qui sont présentés dans ce chapitre, l'aspect perceptif constitue le plus simpliste. En effet, on peut avoir une description précise de la microstructure du brouillard avec sa distribution granulométrique, et en déduire ses propriétés optiques par les équations de Mie, mais lorsqu'il s'agit de décrire son influence sur la perception visuelle, on ne dispose plus que de la seule distance de visibilité météorologique, dont la définition même est subjective.

On a vu qu'il était possible d'établir une relation entre la visibilité et le coefficient d'extinction. Mais la fonction de phase, qui est représentative de la taille des gouttelettes du brouillard, n'est pas prise en compte dans cette relation. Il est donc possible d'envisager deux brouillards de compositions granulométriques différentes, mais de concentrations totales telles que leurs

coefficients d'extinction sont égaux. Ils seront alors caractérisés par la même distance de visibilité. Mais peut-on en conclure que ces deux brouillards perturbent de façon identique la vision d'un usager de la route ?

Pour répondre à cette question, il est indispensable de commencer par s'intéresser aux effets potentiels du brouillard sur la perception visuelle de l'environnement.

Chapitre 2

Les effets du brouillard sur la vision

Le système visuel humain est un mécanisme complexe, qui fonctionne comme un analyseur fréquentiel spatio-temporel. On peut en donner la description suivante, simplifiée à l'extrême : le champ de vision se projette sur les cellules photosensibles de la rétine de chaque œil, qui transforment l'énergie lumineuse en signaux qui sont traités par le cerveau, selon différentes voies en fonction des cellules corticales mises à contribution. Le cerveau peut ainsi coder un nombre donné de stimulations avec une certaine acuité [Ver89] : l'intensité lumineuse, la couleur, la forme (le contraste, l'orientation) et le mouvement (sens, direction, vitesse). Globalement, deux grands groupes de paramètres caractérisent le stimulus : la structure spatio-temporelle et la photocolorimétrie [MD91].

En conditions de conduite dans le brouillard, les stimulations visuelles sont fortement perturbées du fait de la diffusion de la lumière. Il s'en suit naturellement des modifications de la perception de l'environnement. La réduction de la distance de visibilité implique une importante diminution de la quantité d'informations visuelles, notamment du fait de l'occultation des repères éloignés [CDC99]. Mais le brouillard ne se contente pas d'appauvrir l'environnement visuel du conducteur, il en altère également la structure spatiale à la manière d'un filtre fréquentiel passe-bas [DK81] : il « brouille » le signal visuel.

Dans ce chapitre, on analyse les différentes perturbations de la perception visuelle de l'environnement en situation de visibilité réduite, afin de mieux appréhender les effets psychovisuels du brouillard et d'identifier les indices pertinents, tels que le contraste, qui sont à l'origine de ces effets.

2.1 Physiologie de la vision

L'objectif de cette première partie est de donner un aperçu du fonctionnement du système visuel humain. Pour une description plus complète des mécanismes de la vision, les trois tomes de l'ouvrage de Le Grand sur l'optique physiologique font référence [LeG65, LeG72, LeG56].

La rétine, schématisée dans la figure 2.1, comporte deux sortes de récepteurs photosensibles, distribués de manière hétérogène : les « cônes » et les « bâtonnets ». Les cônes sont concentrés au milieu de la rétine, dans la région appelée la fovéa. Ils sont eux-mêmes de trois types, plus particulièrement sensibles respectivement aux courtes, moyennes et grandes longueurs d'onde, ce qui les rend responsables de la vision des couleurs. Les bâtonnets sont absents de la fovéa, mais sont plus nombreux en périphérie, alors que les cônes sont plus rares. Ils sont sensibles aux faibles luminances, indépendamment de la longueur d'onde. À mesure qu'on s'éloigne de la fovéa vers la périphérie, la résolution des champs récepteurs devient plus faible, car leur densité diminue. C'est pourquoi la vision périphérique ne permet pas de distinguer les détails.

Ces cellules photosensibles, qui constituent une couche au fond de la rétine (sous l'épithélium pigmentaire), convertissent l'énergie lumineuse en influx nerveux par un phénomène appelé « transduction ». Ce signal est transmis vers le cortex par les neurones de la voie visuelle (cellules horizontales, bipolaires, amacrines et ganglionnaires). Il existe environ trois cents fois plus de photorécepteurs (cônes et bâtonnets confondus) que de liaisons nerveuses visuelles, ce qui montre que chaque liaison reçoit l'influx de plusieurs récepteurs correspondant à des zones rétiniennes dont le diamètre peut varier entre un et plusieurs centaines de microns. Il existe donc une interaction entre les champs récepteurs, qui permet d'expliquer les variations spatiales de l'acuité visuelle, c'est-à-dire de la capacité de l'œil à résoudre les détails.

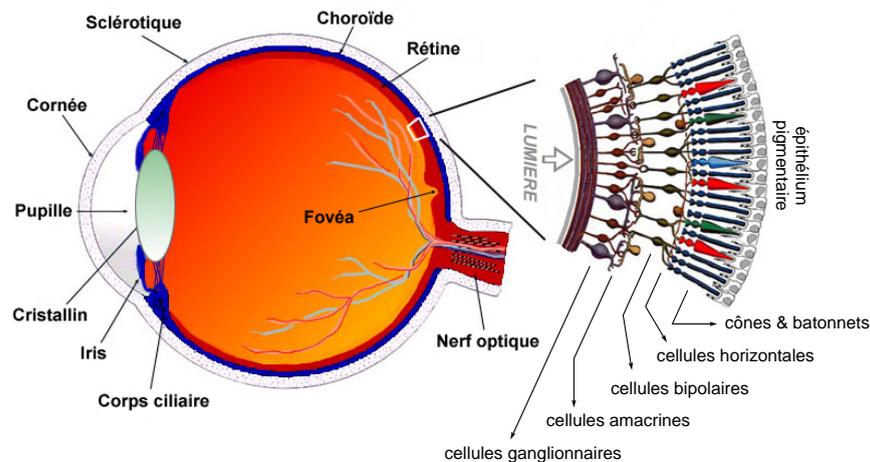


FIG. 2.1 – Anatomie de l'œil et structure de la rétine (schéma adapté d'après [KFN00]).

L'image rétinienne, après transduction dans les récepteurs, est codée sous la forme d'un nombre restreint de caractéristiques locales : contraste, orientation des contours, fréquences spatiales et disparités binoculaires (qui fournissent des indices de relief et de direction de mouve-

ment). Le codage est fait de deux manières : les cellules « toniques » sont sensibles à l'amplitude d'un signal, alors que les cellules « phasiques » sont sensibles à ses variations dans le temps. Ces sensations visuelles sont ensuite intégrées avec d'autres sensations dans un processus cognitif, dans lequel la mémoire joue un rôle important, qui permet de prendre conscience de ce qui est vu par l'œil.

2.2 Vision des formes

2.2.1 Décomposition fréquentielle de l'environnement visuel

Pour qu'un objet soit vu, il faut qu'il puisse être discerné de son environnement. La vision des formes peut donc être rapportée à la vision des contrastes (variations relatives de luminance). Une scène contient des éléments plus ou moins détaillés, tels que la forme générale d'un bâtiment ou l'agencement des briques sur la façade. Les niveaux de détail constituent ce qu'on appelle les fréquences spatiales : les formes grossières correspondent aux basses fréquences et les détails fins aux hautes fréquences. La figure 2.2 permet de visualiser ce concept.

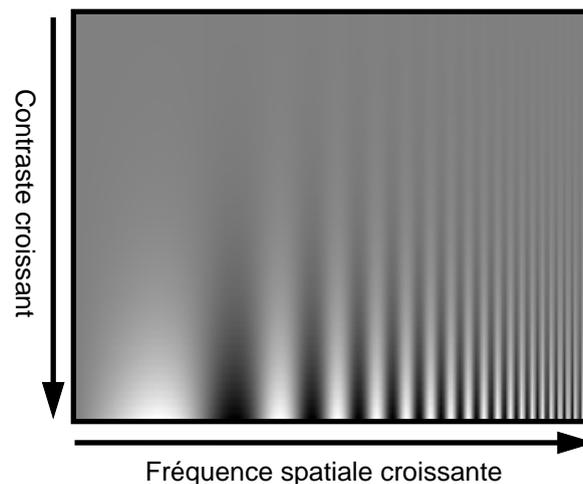
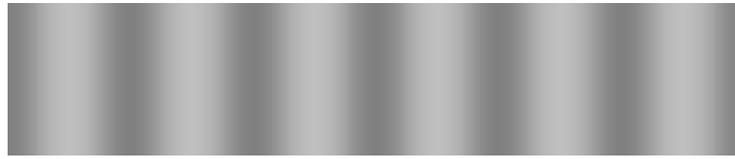


FIG. 2.2 – *Contrastes et fréquences spatiales.*

L'image de la scène qui se forme sur la rétine est en fait constituée d'une série de composantes correspondant chacune à une fréquence spatiale. Par exemple, une variation sinusoïdale de luminance ne contient qu'une seule fréquence spatiale, égale à la fréquence de la sinusoïde. Par contre une série d'échelons, formée d'une succession de barres alternativement claires et foncées, est en fait une somme de réseaux sinusoïdaux dont la fondamentale aura la même fréquence et la même amplitude que le réseau carré, et dont les harmoniques successives voient leur fréquence augmenter et leur amplitude diminuer, comme le montre la figure 2.3.



$$L(x) = L_{\min} + \frac{1}{2}(L_{\max} - L_{\min})\left(1 + \sin\left(\frac{2\pi x}{\Delta x}\right)\right)$$



$$L(x) = L_{\min} + \frac{1}{2}(L_{\max} - L_{\min})\left(1 + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin\left((2n+1)\frac{2\pi x}{\Delta x}\right)\right)$$

FIG. 2.3 – Décomposition fréquentielle du contraste.

2.2.2 Fonction de sensibilité au contraste

Pour un observateur donné, adapté à un environnement lumineux donné, le seuil de détection du contraste varie en fonction des fréquences spatiales. On caractérise donc la vision du contraste par une courbe indiquant les seuils de détection pour une plage de fréquences spatiales. Il s'agit de la fonction de sensibilité aux contrastes, dont un exemple typique est donné en figure 2.4 pour des conditions idéales d'observation. Elle est souvent interprétée de façon abusive comme la fonction de transfert du système visuel. La fonction de sensibilité aux contrastes varie en fonction de nombreux paramètres [Mon92] (le niveau lumineux d'adaptation, l'orientation, la couleur, etc.), et notamment en fonction de l'excentricité, c'est-à-dire la distance angulaire par rapport à l'axe de vision fovéale. La vision périphérique est un aspect essentiel pour le conducteur. L'acuité optimale en vision centrale correspond à une fréquence d'environ 3 cycles par degré (cpd), alors qu'on ne distingue plus rien au-delà d'environ 30 cpd. La fréquence de coupure haute et le maximum de sensibilité diminuent avec l'excentricité, alors qu'au niveau des basses fréquences spatiales, la pente de la courbe évolue peu [BVMC83, MBP86]. En fait, on constate en général que l'information nécessaire à la reconnaissance des éléments d'une image est essentiellement contenue dans les basses et moyennes fréquences du spectre spatial [Bon80].

2.2.3 Impact du brouillard sur la vision des formes

Durant l'observation d'une scène à travers un milieu dispersé, une partie de l'énergie des régions les plus lumineuses va être déviée par la diffusion et se superposer aux régions plus sombres, diminuant ainsi le contraste général de l'image perçue. Plus on se situe dans les hautes

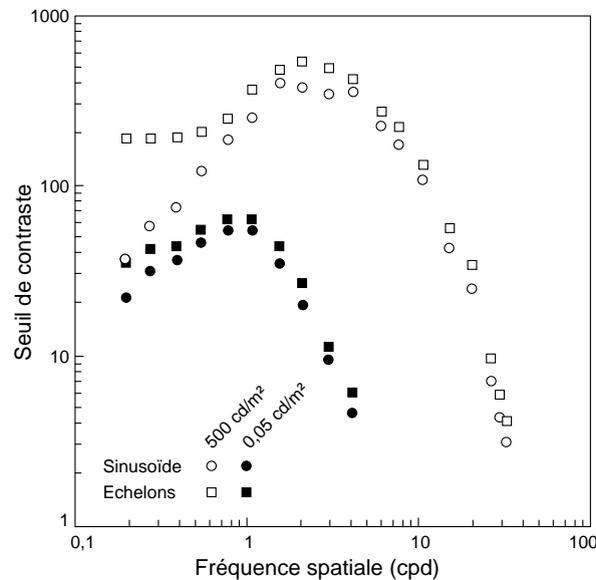


FIG. 2.4 – Courbes de sensibilité au contraste en vision fovéale pour des observateurs jeunes adultes en conditions d'adaptation photopique (500 cd.m^{-2}) et scotopique ($0,05 \text{ cd.m}^{-2}$) (adaptées d'après [Mon92]).

fréquences spatiales, plus les régions contrastées sont adjacentes, donc plus le contraste sera diminué. On peut donc estimer que le brouillard affaiblit le contraste de manière croissante en fonction des fréquences spatiales [MNSS78]. Malgré certains résultats expérimentaux tendant à montrer une atténuation uniforme du contraste [Zou94, AW97], les études expérimentales [MNSS78, VDS85, VDK90, Nam92] et théoriques [MNSS78, DK81, VDS85, BDIZ93, ZK94] s'accordent en général pour constater que le brouillard joue effectivement le rôle d'un atténuateur sélectif du contraste des objets lumineux.

2.3 Perception du mouvement

La perception visuelle du mouvement est un mécanisme extrêmement complexe, car il fait intervenir l'interaction spatio-temporelle du système visuel. Les dimensions et la texture d'un objet, ainsi que celles du fond sur lequel il se déplace, constituent la composante spatiale, alors que la vitesse de déplacement apporte la composante temporelle. Le système visuel traite les informations temporelles par une analyse fréquentielle similaire à celle des informations spatiales [Mon92] (figure 2.5).

2.3.1 Détection d'un objet en mouvement

Il faut préciser que dans certains cas, l'observateur détecte un mouvement sans reconnaître l'objet qui se déplace, alors que dans d'autres cas il reconnaît un objet, mais sans percevoir son mouvement. Tout cela dépend des fréquences spatiales et temporelles impliquées. Des études

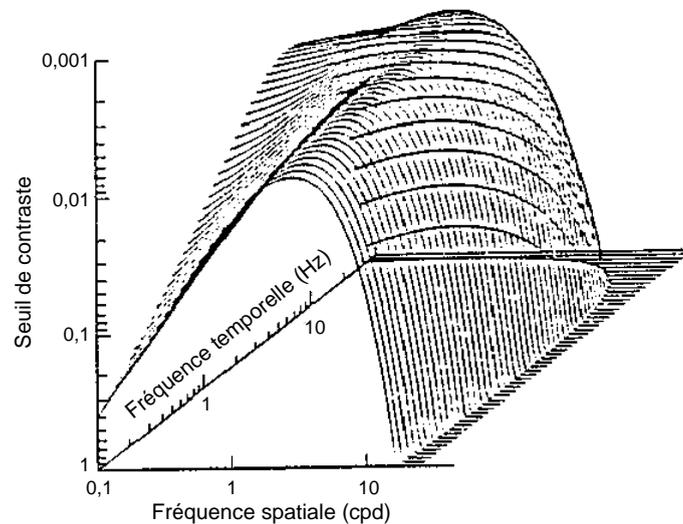


FIG. 2.5 – Courbe de sensibilité spatio-temporelle au contraste [Kel94].

physiologiques [Shi77, Mon92] ont montré que l'influence de l'information spatiale était surtout importante pour les basses fréquences temporelles. Ainsi, moins l'environnement contient de hautes fréquences spatiales (objet plus grand, bords moins nets ou absence de texture), plus le contraste doit être important pour permettre la détection d'un mouvement lent.

2.3.1.1 Sensibilité temporelle

Contrairement à la sensibilité spatiale, la sensibilité temporelle est pratiquement indépendante de l'excentricité [MN84, Mon92]. La vision périphérique joue donc un rôle essentiel dans la vision dynamique [MD91], car la détection d'un mouvement dans la périphérie du champ visuel (le coin de l'œil) déclenche un réflexe oculaire qui dirige le regard vers l'objet qui se déplace. Celui-ci est ainsi examiné en vision centrale, où la sensibilité spatiale est optimale.

2.3.1.2 Impact du brouillard

Lorsque la diffusion de la lumière par les gouttelettes de brouillard réduit le contraste, une partie de l'information visuelle disparaît en tombant sous le seuil de sensibilité, principalement dans les hautes fréquences spatiales (détails fins et bords nets). L'environnement dans le brouillard contient donc moins de hautes fréquences spatiales, ce qui entraîne une détérioration de la sensibilité au mouvement, surtout pour de faibles vitesses, telles que celles mises en jeu dans les déplacements en profondeur, c'est-à-dire pour des objets qui s'éloignent ou se rapprochent : le déplacement est uniquement matérialisé par les bords de l'objet, dont la taille apparente change.

2.3.2 Perception de la vitesse et de la direction de déplacement

2.3.2.1 Mécanismes de perception du mouvement

Les connaissances actuelles en neurophysiologie de la vision ne permettent d'émettre que des hypothèses en ce qui concerne les mécanismes de perception de la vitesse par le système visuel. Des travaux ont toutefois permis d'identifier le contraste comme un facteur influant sur ces mécanismes. Les expériences de Stone et Thompson [ST92] ont confirmé les résultats de nombreuses autres études sur le sujet : le système visuel humain ne réussit que partiellement à estimer la vitesse indépendamment du contraste. Lorsque deux objets se déplacent à la même vitesse, l'objet dont le contraste par rapport au fond est le plus faible semble se déplacer moins vite. L'erreur sur la vitesse est de 30% en moyenne, et peut atteindre 50%. Stone et Thompson ont également mis en évidence l'influence du contraste sur l'évaluation de la direction de déplacement. C'est le contraste de la texture de l'objet qui intervient dans ce cas : plus l'objet est uniforme (texture faiblement contrastée), plus l'erreur sur la direction de son mouvement est susceptible d'être faible [ST92].

2.3.2.2 Impact du brouillard

Étant donné que le brouillard diminue les contrastes en fonction de la distance, et que le contraste influe sur la perception des paramètres d'un déplacement, il s'en suit que le brouillard empêche une juste estimation de ces paramètres. C'est particulièrement le cas pour un conducteur, pour qui tout est en mouvement, et qui risque de mal juger son cap, la disposition de son environnement ou la trajectoire d'un autre véhicule [Ros75, ST92]. Snowden *et al.* [SSR98] ont pu mettre en évidence, grâce à la simulation, une nette sous-estimation des vitesses dans des conditions correspondant à une visibilité réduite. Cavallo *et al.* [CDC99] utilisant également la simulation de conduite mais dans des conditions plus réalistes, n'ont toutefois pas constaté un phénomène aussi marqué.

2.4 Perception des distances

2.4.1 Mécanismes de la perception des distances

Pour évaluer une distance, le système visuel utilise tous les éléments qui sont à sa disposition dans la projection binoculaire de l'environnement : la dimension des objets, leur texture, leur luminance, les ombres projetées, l'interposition, la parallaxe, la perspective, etc. La plupart de ces indices sont eux-mêmes inférés à partir de la structure spatio-temporelle et de la photométrimétrie du champ visuel. C'est la redondance d'indices qui permet, par recouvrements, de minimiser l'erreur d'évaluation. La vision stéréoscopique joue un rôle prépondérant en vision de près, par l'intermédiaire de la disparité entre les deux images rétiniennes. Mais pour des distances supérieures à 50 m, les indices monoculaires reprennent le dessus.

2.4.2 Impact de l'atténuation du contraste

Si on diminue les contrastes dans la scène, certains objets disparaissent, et les détails de ceux qui peuvent encore être vus sont effacés. Par conséquent, il est plus difficile d'utiliser les textures ou les ombres pour évaluer les distances. De plus, des images peu contrastées rendent les disparités difficiles à détecter, et la faible sensibilité au contraste en vision périphérique réduit les informations d'arrière-plan. Tout cela conduit à une forte réduction de l'acuité stéréoscopique. Dans ces conditions, le système visuel se base plutôt sur la perspective atmosphérique (plus les objets sont éloignés, plus leur couleur se modifie pour finalement se confondre avec celle de l'arrière-plan) pour estimer les distances [Mid52]. Mais ne pouvant plus faire appel à des indices redondants, il est à la merci de toutes les distorsions apportées par son fonctionnement intrinsèque. Par exemple, l'œil adapté à la lumière du jour est plus sensible au rouge qu'au bleu (c'est le contraire pour des conditions nocturnes) ; par conséquent, s'il se base uniquement sur l'intensité lumineuse pour évaluer la distance d'un objet rouge et celle d'un objet bleu, il va conclure que l'objet bleu est plus éloigné car moins lumineux, alors que les deux objets sont à la même distance. C'est là une distorsion systématique, à laquelle le système visuel est habitué, et qu'il corrige facilement de manière cognitive dans de bonnes conditions de visibilité [Ros75].

2.4.3 Impact du brouillard

Le brouillard joue le même rôle dans la perception des distances que dans celle du mouvement. En atténuant les contrastes, il réduit notablement la quantité d'informations dans l'environnement, empêchant le système visuel de corriger ses erreurs. Des psychologues se sont penchés sur la question, et expliquent que la vision dans le brouillard conduit effectivement à des erreurs systématiques dans l'évaluation des distances, et par conséquent des dimensions [Ros75, Bro83]. Il semble en effet exister un principe d'invariance taille-distance entre la taille apparente, la distance apparente et la taille rétinienne d'un objet. Ce principe fait que le cerveau tend à compenser la réduction de taille d'un objet distant, lui donnant une taille apparente plus proche de celle qu'il aurait à faible distance.

En ce qui concerne la conduite dans le brouillard, la tendance des automobilistes à surestimer les distances a été confirmée par Cavallo *et al.* grâce à des essais avec des feux arrière de véhicule en brouillard artificiel dans des brouillards nocturnes ou très denses [CDCL97], mais pas sur simulateur de conduite avec un brouillard diurne de densité moyenne ou faible [CDC99]. Il semble en fait que la surestimation de la distance du véhicule suivi intervienne uniquement lorsque la densité du brouillard est telle que seuls les feux arrière sont perceptibles.

2.5 Vision des couleurs

Il a été démontré que la diffusion de Rayleigh (diffusion de la lumière par les molécules d'air) n'influe sur la vision des couleurs qu'à des distances supérieures à 100 km [Bla85]. Elle est la cause du bleuissement de l'atmosphère. Mais cette théorie implique une atmosphère dépourvue de particules de la taille de celles qui forment le brouillard. Elle implique en effet des

diamètres inférieurs au dixième de la longueur d'onde considérée. Pour des particules de taille plus importante, ce sont les théories de Mie qui prennent alors le relais [Mid52].

Toutefois, les études qui ont abordé le problème de la vision des couleurs dans le brouillard semblent s'accorder pour affirmer que la diffusion de la lumière par une atmosphère contenant des gouttelettes d'eau en suspension n'introduit aucune sélectivité chromatique [Mid52, TL75, Bla81, CIE92, Pau93]. La raison invoquée est la taille des particules d'eau, assez importante dans le brouillard pour les rendre parfaitement diffusantes. Il existe bien sûr des gouttelettes plus petites, qui entrent dans le domaine d'application des théories de Mie, voire de Rayleigh, mais leur effet absorbant a été considéré négligeable. En effet, des études ont montré que la partie absorbée concerne environ 0,5 % de l'énergie lumineuse [Mid52]. L'expérimentation a jusqu'ici étayé cette théorie.

La seule conséquence du brouillard sur la vision des couleurs est une diminution de la saturation qui s'accroît avec la distance [CIE92]. Cette désaturation (« blanchissement » des couleurs) est due au voile atmosphérique (à l'origine de la perspective aérienne) qui remplace progressivement les couleurs de la scène par celle du brouillard [Mid52].

2.6 Autres effets

2.6.1 Les bords flous

Il existe une croyance populaire selon laquelle le brouillard rendrait flous les bords des objets : c'est ce qu'on appelle « l'effet de verre dépoli ». Certaines études sur la simulation de vol avec visibilité réduite préconisent d'intégrer cet effet [Joh78].

L'improbabilité de ce phénomène a été démontrée théoriquement, puis expérimentalement par de nombreuses études citées par Middleton [Mid52]. Plus récemment, Linskens et Bohren [LB94] ont montré qu'il n'est possible d'observer des bords flous que dans certaines conditions très particulières. Cet effet nécessite des particules de taille importante (diamètre supérieur à 15 μm) et une concentration assez forte, permettant néanmoins de percevoir l'objet. Ces conditions peuvent être réunies dans certains types de nuages, dont la densité varie de façon importante et qui sont composés de gouttelettes de taille suffisante, mais rarement dans le brouillard. Des travaux théoriques et expérimentaux ont montré eux aussi que « l'effet de verre dépoli » n'existe pas, au moins pour l'observation de jour [Dro90, VDK90]. Drofa [Dro90] parle de bords flous pour l'observation nocturne d'un objet lumineux, mais sans étayer ses affirmations. Si le brouillard est un atténuateur sélectif qui réduit l'amplitude du contraste dans les hautes fréquences spatiales, il peut sembler paradoxal qu'il ne rende pas les bords flous. En fait, l'image d'un objet se compose d'une série de réseau sinusoïdaux à différentes fréquences spatiales. Pour la rendre floue, il faut réduire l'amplitude de ses harmoniques à une valeur inférieure au seuil de sensibilité, tout en gardant l'amplitude de sa fondamentale supérieure à ce seuil. Or ceci a très peu de chance d'arriver selon Linskens et Bohren [LB94].

2.6.2 Les halos

Le fait que « l'effet de verre dépoli » soit si généralement accepté peut venir de la confusion entre des bords flous et le halo qui peut parfois être observé autour des objets très lumineux vus à travers un milieu diffusant [LB94], comme le soleil à travers les nuages. Ce halo est dû aux grosses particules de l'atmosphère, dont le solide de diffusion possède un pic important vers l'avant. Le halo est beaucoup moins lumineux que l'objet, et étant causé par la diffusion primaire, il ne peut être observé que dans un milieu de faible densité optique [LB94]. En ce qui concerne le brouillard nocturne, la luminance de voile n'est plus là pour masquer un éventuel halo, qui peut donc être perçu par l'observateur, comme l'affirme Drofa [Dro90].

On peut donc retenir que le brouillard, dans les conditions de visibilité qui nous intéressent, n'entraîne aucune distorsion de type bords diffus. Pour ce qui est du halo, il semble qu'il ne soit pas observé en conditions diurnes, mais qu'il puisse être perçu la nuit autour d'une source assez lumineuse et assez proche.

2.7 Conclusion

De la synthèse présentée dans ce chapitre, il ressort que le contraste joue un rôle essentiel dans les diverses perturbations de la perception visuelle en milieu diffusant. On peut considérer que c'est la modification du contraste qui est à l'origine des effets psychophysiques observés par temps de brouillard. Cette conclusion est étayée par les conclusions de l'étude menée par DeYoe et Van Essen [DV88]. Ils expliquent que les canaux d'information entre les yeux et le cerveau ne se contentent pas de faire correspondre chaque indice visuel à un processus d'analyse pour un type de perception. En fait, à partir des informations rétiniennes, le cerveau déduit un certain nombre d'indices qui à leurs tours vont servir à déterminer les attributs de l'image vue (formes, textures, couleurs, mouvement, positions relatives, etc.). Et selon DeYoe et Van Essen, c'est la distribution spatiale de luminance dans l'image vue qui permet d'inférer les autres propriétés.

On peut donc raisonnablement estimer que la caractérisation des effets du brouillard sur la visibilité de la route passe par la description des effets de la diffusion de la lumière sur le contraste. On va donc chercher à définir une fonction décrivant les perturbations de la distribution spatiale de luminance reçue par l'œil de l'observateur, causées par la transmission à travers un milieu diffusant.

Chapitre 3

Prise en compte des milieux diffusants en synthèse d'images

Le brouillard est un phénomène complexe, tant par sa nature que par ses effets sur la visibilité. Pour caractériser, puis modéliser la façon dont il perturbe l'image de l'infrastructure routière que perçoit le conducteur (le signal visuel), il est indispensable de disposer d'un moyen de recueil de cette image.

Le recueil de données expérimentales en conditions de brouillard naturel est extrêmement difficile. En effet, il est pratiquement impossible de prévoir le lieu et le moment de l'apparition du phénomène, et tout-à-fait impossible d'en maîtriser les paramètres microphysiques. L'utilisation de moyens de production de brouillard artificiel qualifiés permet de surmonter partiellement ces obstacles, mais restreint fortement le champ exploratoire. On a donc privilégié l'approche par simulation numérique, qui constitue une alternative inévitable pour généraliser les conditions de l'étude. En outre, la simulation offre l'avantage d'une complète maîtrise des paramètres influents et par conséquent une parfaite reproductibilité des résultats.

Le but étant de générer des images perturbées par le brouillard, il est naturel de chercher une solution dans le domaine de la synthèse d'images, en procédant d'abord à un état de l'art. La montée en puissance des ordinateurs a favorisé le développement des méthodes de synthèse d'images physiquement réalistes durant ces vingt dernières années [Gla95]. Les premiers algorithmes se limitaient à des scènes constituées de surfaces parfaitement diffuses ou spéculaires placées dans le vide. La prise en compte de la réflexion directionnelle des matériaux est venue progressivement. L'extension aux milieux participants est encore plus récente, car d'une part elle nécessite des algorithmes plus complexes et donc plus coûteux à mettre en œuvre, et d'autre part les propriétés de diffusion directionnelle des milieux dispersés sont moins connues que les propriétés de réflexion directionnelle des matériaux.

Après quelques rappels de radiométrie et de photométrie, le présent chapitre décrit le problème de l'éclairage global, puis passe en revue les différents algorithmes qui permettent de le résoudre. L'objectif n'est pas d'entrer dans les détails d'implémentation, mais d'établir un comparatif des degrés de réalisme physique, notamment dans le traitement des milieux participants. En conclusion, on choisit l'algorithme le plus adapté pour l'étude des effets fréquentiels du brouillard sur le contraste.

3.1 Quelques rappels de radiométrie et de photométrie

Les notions rapportées dans cette section sont extraites du cours d'éclairage de l'Association Française de l'Éclairage [AFE91], auquel on pourra utilement se reporter pour plus de détails sur la quantification de l'énergie lumineuse.

3.1.1 Radiométrie

3.1.1.1 Grandeurs énergétiques

La lumière est un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde est comprise entre 380 et 780 nanomètres, c'est-à-dire dans le spectre visible par l'œil humain. Ce rayonnement transporte à travers l'espace une certaine quantité d'énergie, Q .

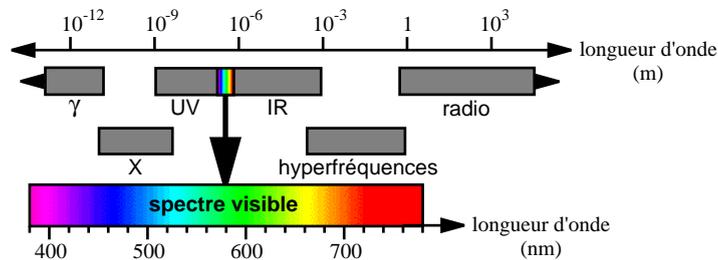


FIG. 3.1 – Le système visuel humain est sensible aux rayonnements électromagnétiques dont la longueur d'onde est comprise entre 380 et 780 nm.

Le flux énergétique correspondant, Φ_e , est la puissance du rayonnement, c'est-à-dire la quantité d'énergie par unité de temps :

$$\Phi_e = dQ/dt \quad (3.1)$$

La densité du flux traversant une portion de l'espace délimitée par une surface dA est appelée éclairement, E_e , ou exitance¹, selon qu'on considère un flux entrant ou sortant :

$$E_e = d\Phi_e/dA \quad (3.2)$$

La luminance énergétique L_e est la fraction de ce flux qui traverse une surface dA dans un angle solide $d\omega$ autour d'une direction $\vec{\omega}$ faisant un angle θ avec la normale \vec{n} à la surface (figure 3.2(a)) :

$$L_e = dE_e/d\omega = \frac{d^2\Phi_e}{d\omega dA \cos \theta} \quad (3.3)$$

Si on considère une source lumineuse ponctuelle, la fraction du flux qu'elle rayonne dans une portion de l'espace délimitée par un angle solide $d\omega$ définit son intensité énergétique I_e (figure 3.2(b)) :

$$I_e = d\Phi_e/d\omega \quad (3.4)$$

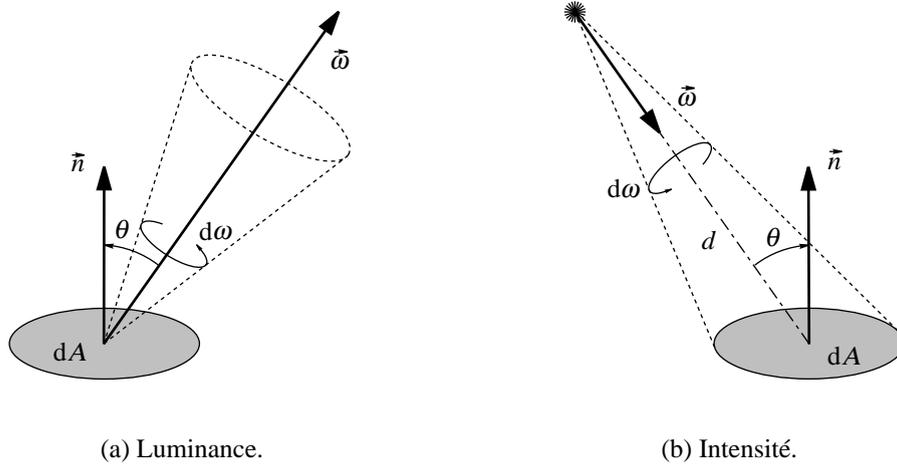


FIG. 3.2 – Schémas illustrant les définitions de la luminance (a) et de l'intensité (b).

Lorsqu'elle illumine une surface dA située à une distance d dans une direction faisant un angle θ avec la normale, on établit aisément d'après les définitions de l'éclairement (3.2) et de l'angle solide délimité depuis la source par la surface ($d\omega = dA \cos \theta / d^2$), que cette source génère un éclairement E_e donné par :

$$E_e = I_e \cos \theta / d^2 \quad (3.5)$$

Les unités employées pour les grandeurs énergétiques sont les suivantes :

- l'énergie électromagnétique s'exprime en joules (J),
- le flux énergétique s'exprime en watts (W), ou $J \cdot s^{-1}$,
- l'éclairement et l'exitance énergétiques s'expriment en $W \cdot m^{-2}$,
- la luminance énergétique s'exprime en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$,
- l'intensité énergétique s'exprime en $W \cdot sr^{-1}$.

3.1.1.2 Composition spectrale

L'énergie lumineuse se répartit sur le spectre visible, de manière étendue (polychromatique, comme pour l'énergie solaire) ou concentrée (monochromatique, comme pour un rayonnement laser). La densité spectrale X_λ de la grandeur énergétique X_e est la fraction de cette grandeur par unité de longueur d'onde :

$$X_\lambda = dX_e / d\lambda \quad (3.6)$$

On définit ainsi la densité spectrale de flux, d'éclairement, de luminance et d'intensité.

1. Le terme radiosité est également utilisé pour désigner l'exitance énergétique.

3.1.2 Photométrie

3.1.2.1 Sensibilité spectrale

La photométrie quantifie l'impact de l'énergie électromagnétique transportée par la lumière sur le système visuel humain. Cet impact varie avec la longueur d'onde. On utilise donc un facteur de pondération, $V(\lambda)$, appelé efficacité lumineuse spectrale relative, qui représente la sensibilité spectrale de l'œil dans des conditions spécifiques d'observation (figure 3.3). Ce facteur est défini par égalisation de la sensation générée par des plages lumineuses monochromatiques de luminances énergétiques respectives $L_e(\lambda_1)$ et $L_e(\lambda_2)$. On a alors :

$$V(\lambda_1) L_e(\lambda_1) = V(\lambda_2) L_e(\lambda_2) \quad (3.7)$$

Connaissant $V(\lambda)$, il est possible de quantifier la valeur lumineuse X_v d'une grandeur énergétique monochromatique $X_e(\lambda)$ de la manière suivante :

$$X_v = V(\lambda) X_e(\lambda) \quad (3.8)$$

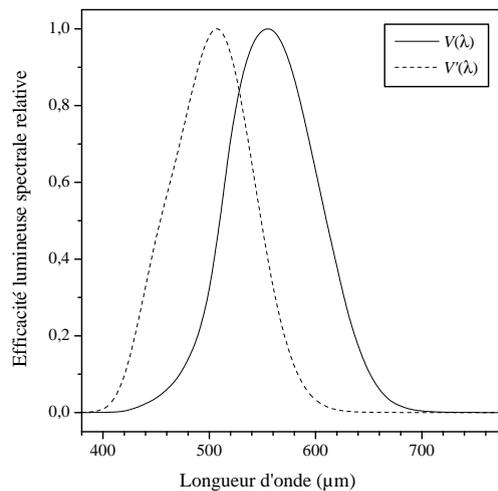


FIG. 3.3 – Courbes d'efficacité lumineuse spectrale relative pour l'observateur de référence défini par la CIE : $V(\lambda)$ en vision diurne normale, et $V'(\lambda)$ par faible luminosité.

3.1.2.2 Grandeurs lumineuses

Les unités lumineuses sont les suivantes :

- le flux lumineux s'exprime en lumens (lm),

- l'intensité lumineuse s'exprime en candelas (cd), ou $\text{lm}\cdot\text{sr}^{-1}$,
- l'éclairement (ou l'existance) lumineux s'exprime en lux (lx), ou $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$,
- la luminance lumineuse s'exprime en candelas par mètre carré ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$).

Il est possible de généraliser la notion de grandeur lumineuse à des rayonnements non monochromatiques en convoluant les grandeurs radiométriques par la sensibilité spectrale :

$$X_v = K_m \int_{\mathcal{L}} V(\lambda) X_e(\lambda) d\lambda \quad (3.9)$$

où X peut représenter le flux, l'intensité, l'éclairement ou la luminance, et \mathcal{L} représente le spectre des longueurs d'ondes visibles. Le coefficient K_m est lié aux unités utilisées : sa valeur est fixée empiriquement à $683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ en considérant qu'un rayonnement monochromatique de longueur d'onde 555 nm et de puissance 1 W équivaut à un flux lumineux de 683 lm en vision diurne normale (photopique). En vision nocturne (scotopique), la conversion des grandeurs énergétiques en grandeurs lumineuses doit tenir compte du changement de sensibilité spectrale illustré en figure 3.3.

3.1.3 Caractérisation photométrique des éléments d'une scène routière

De manière générale, une scène routière est constituée de trois types d'éléments qui interagissent différemment avec la lumière :

- des sources qui émettent de la lumière,
- un milieu qui la diffuse,
- et des surfaces qui la réfléchissent.

Chaque élément peut être décrit à l'aide d'un certain nombre de paramètres photométriques et colorimétriques selon sa nature. L'aspect colorimétrique, commun à tous les éléments, est décrit par une fonction de densité spectrale. L'aspect directif de la propagation du flux lumineux est lui aussi commun à tous les éléments, et décrit par une fonction de répartition directionnelle (goniométrique).

3.1.3.1 Sources lumineuses

Une source lumineuse est caractérisée photométriquement par le flux total Φ qu'elle émet et la répartition directionnelle de ce flux, décrite par une distribution goniométrique d'intensité $I(\vec{\omega})$, également appelée « solide photométrique » :

$$\Phi = \int_{4\pi} I(\vec{\omega}) d\omega \quad (3.10)$$

3.1.3.2 Surfaces réfléchissantes

Une surface est caractérisée photométriquement par son facteur de réflexion ρ , indiquant le rapport entre le flux réfléchi Φ_r et le flux incident Φ_i .

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} \quad (3.11)$$

La répartition directionnelle du flux réfléchi est décrite par le coefficient de luminance² $q(\vec{\omega}_i, \vec{\omega})$, qui indique le rapport entre la luminance réfléchie $dL(\vec{\omega})$ et l'éclairement incident $dE(\vec{\omega}_i)$:

$$q(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}) = \frac{dL(\vec{\omega})}{dE(\vec{\omega}_i)} \quad (3.12)$$

où $\vec{\omega}_i$ est la direction d'incidence et $\vec{\omega}$ est la direction de réflexion.

Il est souvent fait appel à des modèles analytiques de réflexion pour simplifier les calculs d'échanges lumineux, notamment en synthèse d'images. Les deux plus utilisés [AFE91] sont les réflecteurs diffus (ou lambertiens) et les réflecteurs spéculaires (miroirs) : les surfaces diffuses réfléchissent la lumière de façon uniforme et indépendante de la direction d'incidence, selon la loi de Lambert ; les surfaces spéculaires réfléchissent la lumière dans la direction symétrique de celle de la direction d'incidence par rapport à leur normale, selon la loi de Descartes [Des37].

3.1.3.3 Milieu diffusant

Un milieu diffusant tel que le brouillard est caractérisé photométriquement, on l'a vu dans le chapitre précédent, par son coefficient d'extinction K et son albédo a . La répartition directionnelle du flux diffusé par un élément de volume est décrite par la fonction de phase $P(\vec{\omega}_i, \vec{\omega})$, qui indique le rapport entre l'intensité émise $I(\vec{\omega}_i, \vec{\omega})$ et le flux incident Φ_i pondéré par l'albédo :

$$P(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}) = \frac{4\pi}{a} \frac{I(\vec{\omega}_i, \vec{\omega})}{\Phi_i} \quad (3.13)$$

où $\vec{\omega}_i$ est la direction d'incidence et $\vec{\omega}$ est la direction de diffusion.

3.2 Le problème de l'éclairage global

Pour des informations détaillées sur les techniques de synthèse d'images et les méthodes de résolution du problème de l'éclairage global, il est utile de se référer à l'ouvrage exhaustif de Glassner sur les principes de la synthèse d'images [Gla95].

3.2.1 Image et luminance

Avant tout, il est important de rappeler qu'on utilise le terme « image » pour désigner la distribution de luminance reçue par le système visuel d'un observateur dans des conditions spécifiques d'éclairage et de visibilité. Cette luminance provient des différents éléments de l'environnement qui sont présents dans le champ visuel de l'observateur. L'énergie lumineuse ainsi générée provient initialement des sources lumineuses, naturelles ou artificielles, mais elle est susceptible d'avoir subi de multiples interactions avec les autres éléments de la scène, et éventuellement avec le milieu de propagation, préalablement à sa contribution au signal visuel.

2. Dans le domaine de la synthèse d'images, le coefficient de luminance est souvent appelé « fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle », ou BRDF (de l'anglais *Bidirectional Reflectance Distribution Function*) [PGMR98].

Selon cette approche, la synthèse d'images consiste à évaluer la distribution de luminance dans le champ visuel d'un observateur à partir de la description géométrique et photométrique de la scène observée. Le « réalisme » photométrique de l'image résultant de cette simulation est d'autant plus grand que les luminances ainsi calculées sont comparables aux luminances qui auraient pu être mesurées dans la scène réelle.

3.2.2 L'équation de transfert radiatif

La génération d'images photométriquement réalistes passe par la résolution du problème de l'éclairage global, qui consiste à évaluer la luminance $L(\mathbf{x}, \vec{\omega})$ en tout point \mathbf{x} et dans toutes les directions $\vec{\omega}$ de la scène qui fait l'objet de la simulation, en tenant compte de toutes les interactions entre la lumière et les éléments de cette scène. Il est possible de formuler ce problème à l'aide d'une équation de transfert intégro-différentielle, issue de la théorie du transport linéaire³. Cette « équation de transfert radiatif » exprime l'équilibre des échanges d'énergie lumineuse entre tous les éléments de la scène. Dans le cas général, l'expression même de cette équation est plutôt complexe [Gla95]. Mais il est possible de faire certaines hypothèses pour s'affranchir des aspects qui n'entrent pas en ligne de compte dans le cas qui nous intéresse. On peut ainsi écarter les phénomènes de polarisation, de phosphorescence et de fluorescence⁴, et considérer que ni les surfaces, ni le milieu, ne sont émissifs. Ensuite, il est pratique de considérer séparément les zones surfaciques et volumiques. On obtient ainsi deux équations de transfert radiatif, qu'il est possible d'exprimer sous la forme suivante [Arv93] :

$$\frac{dL(\mathbf{x}, \vec{\omega})}{d\mathbf{x}} = \int_{2\pi} q(\mathbf{x}, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}) \vec{\omega}_i \cdot \vec{n}(\mathbf{x}) L(\mathbf{x}, \vec{\omega}_i) d\omega_i \quad (3.14a)$$

$$\frac{dL(\mathbf{x}, \vec{\omega})}{d\mathbf{x}} = -K(\mathbf{x})L(\mathbf{x}, \vec{\omega}) + aK(\mathbf{x}) \int_{4\pi} \frac{P(\mathbf{x}, \vec{\omega}_i, \vec{\omega})}{4\pi} L(\mathbf{x}, \vec{\omega}_i) d\omega_i \quad (3.14b)$$

Les paramètres utilisés sont définis ci-dessous, et illustrés dans la figure 3.4.

- \mathbf{x} : position de l'échange radiatif ;
- $\vec{\omega}$, $L(\mathbf{x}, \vec{\omega})$: direction et luminance du rayonnement réfléchi ou diffusé ;
- $\vec{\omega}_i$, $d\omega_i$, $L(\mathbf{x}, \vec{\omega}_i)$: direction, angle solide et luminance du rayonnement incident ;
- $\vec{n}(\mathbf{x})$, $q(\mathbf{x}, \vec{\omega}_i, \vec{\omega})$: normale et coefficient de luminance de la surface ;
- $K(\mathbf{x})$, a , $P(\mathbf{x}, \vec{\omega}_i, \vec{\omega})$: coefficient d'extinction, albédo et fonction de phase du milieu.

3.2.3 Méthodes de résolution

La résolution de l'équation de transfert radiatif (3.14) nécessite des méthodes numériques d'autant plus sophistiquées que le réalisme à obtenir est important et que la scène est géométriquement et photométriquement complexe, sachant que la plupart du temps, complexité et

3. En matière de simulation, le domaine de l'éclairage profite largement des acquis de la thermique.

4. Cette hypothèse permet de traiter chaque longueur d'onde indépendamment. Dans la suite, on considère donc un rayonnement monochromatique, sachant que l'aspect colorimétrique peut être introduit par une simple extension des méthodes présentées.

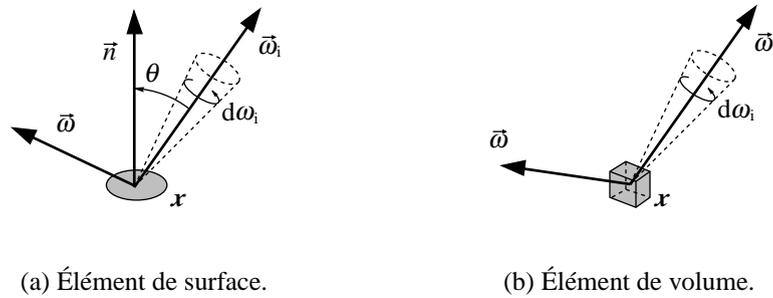


FIG. 3.4 – Illustration des paramètres des équations de transfert radiatif au niveau d'un élément de surface ou de volume.

réalisme vont de paire. Pour rendre le problème plus aisé à résoudre, le moyen le plus répandu consiste à faire des hypothèses simplificatrices supplémentaires, en plus de celles qui ont permis d'écrire l'équation précédente. Mais les capacités de calcul toujours croissantes des ordinateurs permettent aujourd'hui de mettre en œuvre des solutions qui limitent ces compromis sur les bases physiques des phénomènes simulés.

Les algorithmes qui sont utilisés pour résoudre le problème de l'éclairage global en vue de générer des images « photoréalistes » peuvent être classés dans deux grandes catégories : la radiosité et le tracé de rayons [Gla95]. L'approche de la radiosité repose sur une décomposition de la scène en éléments de surface ou de volume, alors que l'approche du tracé de rayons repose sur une décomposition du rayonnement lumineux en éléments de flux. Mis au point à l'origine pour résoudre des cas triviaux, ces deux algorithmes ont depuis été largement améliorés. Ils offrent désormais des solutions pour prendre en compte la participation du milieu de propagation (brouillard, nuages, fumée, etc.) dans les échanges lumineux. Pour ce faire, ils ont dû converger vers des algorithmes hybrides, afin que chacun puisse profiter des avantages de l'autre. C'est pourquoi il est sans doute plus commode désormais de distinguer les algorithmes selon qu'ils sont basés sur une approche déterministe ou probabiliste [Max95, PPS97]. Toutefois, dans le cadre de la présente recherche, il est préférable de s'en tenir à la première classification afin de mieux appréhender l'aspect physique des phénomènes simulés.

3.3 Approche de type radiosité

Pour une description complète de l'algorithme de radiosité, et en particulier des techniques pour calculer les facteurs de forme et des méthodes itératives pour procéder aux échanges lumineux, il est utile de se référer à l'ouvrage de Sillion *et al.* [SP94].

3.3.1 Principe de l'algorithme de radiosité

3.3.1.1 Décomposition en éléments finis

L'algorithme de radiosité est basé sur la méthode des éléments finis : il nécessite de subdiviser la scène en éléments de surface, ou facettes, de taille suffisamment petite pour pouvoir considérer qu'ils émettent une radiosité uniforme en tout point. La méthode consiste alors à calculer les inter-réflexions, c'est-à-dire les échanges énergétiques entre toutes ces surfaces élémentaires.

3.3.1.2 Calcul de l'éclairage direct

La première étape consiste à calculer, pour chacune des facettes, l'éclairage direct reçu de chaque source lumineuse, dite primaire, d'après l'équation 3.5. Cette phase préliminaire fournit une première approximation, généralement grossière⁵, de l'éclairage global de la scène.

3.3.1.3 Calcul des inter-réflexions

La deuxième phase consiste à calculer les inter-réflexions, c'est-à-dire les échanges lumineux entre les facettes. La technique la plus classique est le processus itératif de Southwell : à chaque étape, l'élément de surface le plus énergétique devient lui-même une source dite secondaire, et la part réfléchie de l'énergie qu'il a reçue jusque-là est distribuée à toutes les autres facettes. Chaque échange énergétique fait intervenir un coefficient appelé facteur de forme, qui permet de tenir compte de la position relative et de la géométrie des facettes, ainsi que des occultations éventuelles par d'autres objets de la scène. Le facteur de forme F_{ij} entre les éléments de surface A_i et A_j , qui correspond à la fraction du flux quittant A_i qui est interceptée par A_j , s'exprime par une double intégrale :

$$F_{ij} = \frac{1}{A_j} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi d_{ij}^2} v_{ij} dA_i dA_j \quad (3.15)$$

où θ_i et θ_j sont les angles respectifs entre la normale à une facette et la direction vers l'autre, et d_{ij} est la distance entre les deux (figure 3.5). Le coefficient v_{ij} est égal à 1 si les éléments de surface considérés sont mutuellement visibles ; en cas d'occultation, v_{ij} est nul. L'étape de distribution est répétée jusqu'à ce que l'énergie résiduelle dans la scène soit négligeable comparée à l'énergie due à l'émission directe des sources, ou que la différence entre deux itérations soit devenue imperceptible (ce qui nécessite la définition d'un critère perceptif).

3.3.1.4 Visualisation

À l'issue du processus, on dispose de la luminance en tout point de la scène. Il suffit alors, pour produire l'image d'un point de vue donné, de procéder à un simple lancer de rayon pour trouver la facette vue à travers chaque pixel, et en déduire la luminance correspondante. Si la

5. Le calcul de l'éclairage direct peut être suffisant dans des scènes ouvertes où les inter-réflexions sont négligeables.

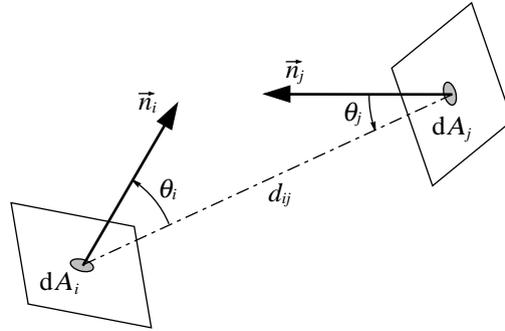


FIG. 3.5 – Illustration des paramètres pour le calcul des facteurs de forme.

complexité géométrique de la scène le permet (s'il n'y a pas trop de facettes), une visualisation interactive est ainsi possible.

3.3.1.5 Hypothèses

Historiquement, l'algorithme repose sur trois hypothèses fondamentales :

- les sources sont ponctuelles ;
- les surfaces sont lambertiennes, c'est-à-dire qu'elles réfléchissent la lumière de manière diffuse (leur luminance est indépendante de la direction de réflexion) ;
- il n'y a pas d'interaction de la lumière avec le milieu.

3.3.2 Extension aux milieux participants

L'extension de l'algorithme de radiosité pour prendre en compte les milieux diffusants (plus couramment appelés milieux participants dans le domaine de la synthèse d'images) a été introduite dans le domaine de la synthèse d'images par Rushmeier et Torrance [RT87]. Il s'agit de la méthode zonale, qui consiste à subdiviser non seulement les surfaces, mais également les volumes, en zones recevant et émettant une énergie uniforme en tout point. L'algorithme reste inchangé, avec une hypothèse supplémentaire : le milieu diffuse la lumière de façon isotrope. Aux échanges énergétiques entre deux facettes A_i et A_j , on ajoute les échanges entre deux éléments de volume, ou voxels, V_p et V_q , et entre une facette A_i et un voxel V_p . Chacun de ces trois types d'échange donne lieu à une redéfinition du facteur de forme :

$$F_{A_i A_j} = \int_{A_i} \int_{A_j} \tau_{ij} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi d_{ij}^2} v_{ij} dA_i dA_j \quad (3.16a)$$

$$F_{V_p V_q} = \int_{V_p} \int_{V_q} \tau_{pq} \frac{1}{\pi d_{pq}^2} v_{pq} dV_p dV_q \quad (3.16b)$$

$$F_{A_i V_p} = \int_{A_i} \int_{V_p} \tau_{ip} \frac{\cos \theta_i}{\pi d_{ip}^2} v_{ip} dA_i dV_p \quad (3.16c)$$

où τ est la densité optique du milieu séparant les zones considérées :

$$\tau(d) = e^{-\int_0^d K(x) dx} \quad (3.17)$$

$K(x)$ indiquant les variations spatiales du coefficient d'extinction du milieu. La phase de rendu doit également être adaptée, afin de tenir compte du milieu. Ainsi, on utilise toujours un lancer de rayon en chaque pixel de l'image, mais ce rayon doit intégrer l'énergie des voxels traversés en plus de la luminance de la facette vue, et tenir compte de l'atténuation en fonction de la distance.

Cette méthode a été implémentée par Bresciani et Rossi [BR93] pour être validée par des mesures en brouillard artificiel. Ils concluent qu'il est possible d'utiliser la méthode zonale pour étudier des systèmes d'éclairage public dans le brouillard, sans toutefois donner d'exemple d'application.

3.3.3 Extension aux matériaux et aux milieux anisotropes

L'hypothèse d'isotropie de la réflexion et de la diffusion constitue une simplification importante, et souvent insatisfaisante. De nombreuses techniques ont été tentées pour lever cette hypothèse, et pouvoir prendre en compte des propriétés photométriques plus générales, en particulier pour les matériaux, mais également pour les milieux dispersés [PPS97], généralement au prix d'une extrême complexité. On parle alors de radiosité généralisée.

Une première méthode, dite des ordonnées discrètes [Lan94], consiste à étendre la discrétisation des positions de l'espace à celle des directions pour représenter la distribution directionnelle d'énergie lumineuse  chang e par les divers éléments surfaciques et volumiques de la scène. On peut également utiliser des fonctions telles que les harmoniques sphériques [BT92] pour représenter ces distributions. Le calcul des échanges lumineux est alors effectué non seulement pour chaque élément de surface et de volume, mais aussi pour chaque élément d'angle solide [Whi93]. Max [Max94] a proposé une approximation de cette méthode permettant de limiter les artefacts (effet « rayonnant ») induits par la discrétisation des directions, en effectuant les échanges lumineux de manière progressive par propagation de l'énergie de chaque zone vers son voisinage.

3.3.4 Limites et solutions

3.3.4.1 Discrétisation de la scène

Le premier problème soulevé par l'algorithme de radiosité est lié au maillage de la scène en éléments finis. La qualité du résultat des calculs est directement affectée par la qualité de ce découpage, qui est pratiquement impossible à réaliser de manière efficace sans préjuger de l'illumination finale de la scène. L'obtention de résultats précis impose donc un maillage fin de l'ensemble de la scène. Une façon de se ramener à un découpage plus léger consiste à utiliser des méthodes dites d'ordre supérieur : au lieu de représenter la distribution des luminances sur une zone en la découpant en éléments de radiosité constante, ces méthodes utilisent des bases de fonctions telles que les ondelettes [Chi92], qui permettent de limiter le nombre de coefficients

dans les zones de faible variation. Mais la méthode la plus efficace est la radiosité hiérarchique : les zones impliquées dans un échange lumineux ne sont découpées que si le facteur de forme dépasse une valeur seuil, ce qui indique qu'une quantité importante d'énergie est échangée, qu'il est probablement utile de détailler. Il est possible de coupler ces deux méthodes.

3.3.4.2 Évaluation des facteurs de forme

L'évaluation des facteurs de forme constitue la deuxième difficulté majeure dans l'algorithme de radiosité, principalement à cause des problèmes d'occultation partielle. Des expressions analytiques sont disponibles dans certains cas particuliers, mais en général, des approximations sont nécessaires. Le plus simple est de considérer que le facteur de forme est constant en tout point de chaque facette, et de procéder à un unique calcul au centre. Néanmoins, à part dans le cas de géométries simples, l'obtention de résultats vraiment précis nécessite l'application de techniques de Monte Carlo.

3.3.4.3 Complexité de mise en œuvre

En fait, l'algorithme de radiosité est vraiment efficace dans les conditions pour lesquelles il a été conçu, c'est-à-dire l'éclairage global dans une scène diffuse sans milieu participant. L'extension aux matériaux non-diffus est possible, mais la prise en compte du phénomène de diffusion anisotrope et multiple donne lieu à des solutions extrêmement coûteuses en structure de données et en temps de calcul, du fait de la discrétisation fine – celle du milieu de propagation, en particulier – nécessitée par l'approche par éléments finis. L'approche hiérarchique permet de compenser en partie cet accroissement de la complexité, mais nécessite des procédures de décision heuristiques (pour savoir s'il faut subdiviser les zones) délicates à mettre au point d'abord, et à mettre en œuvre ensuite. Pour finir, le principal attrait de cet algorithme, qui est de produire des résultats indépendants du point de vue, est fortement amoindri par le fait que la prise en compte d'un milieu participant, même simpliste du point de vue photométrique, impose des techniques de rendu évoluées faisant appel au tracé de rayons pour générer des images.

3.4 Approche de type tracé de rayons

3.4.1 Principe de l'algorithme de tracé de rayons

Partant du constat expérimental selon lequel une onde lumineuse monochromatique se propage en ligne droite dans un milieu parfaitement transparent, l'optique géométrique représente la lumière émise par une source ponctuelle⁶ sous la forme d'une infinité de rayons lumineux distribués dans l'ensemble des directions d'émission [GA97]. Le parcours de chaque rayon est rectiligne, tant qu'il ne rencontre pas d'obstacle ou de discontinuité sur sa trajectoire. Au contact d'une surface ou d'un dioptre, il est respectivement réfléchi ou réfracté dans une nouvelle direction. Ceux de ces rayons qui pénètrent l'œil de l'observateur contribuent à la formation de l'image que celui-ci perçoit.

6. Une source étendue est considérée comme un ensemble de sources ponctuelles.

3.4.1.1 Tracé de rayons avant

On peut adopter cette perspective pour simuler la propagation de la lumière dans une scène en échantillonnant les rayons lumineux émis par les sources d'éclairage et en construisant leurs trajectoires par application des lois de l'optique géométrique. Pour former une image de la scène ainsi illuminée, il faut recueillir les rayons qui atteignent l'œil de l'observateur.

Le problème de cette méthode, telle qu'elle est présentée, est qu'elle nécessite de suivre un nombre prohibitif de rayons pour générer une image représentative de la réalité. En effet, une majorité des rayons va sortir de l'environnement ou être absorbée par les surfaces sans avoir contribué à l'image, rendant la méthode extrêmement inefficace. Elle a toutefois l'avantage d'être physiquement intuitive, puisque les rayons sont suivis depuis les sources dans le sens naturel de propagation de la lumière.

3.4.1.2 Tracé de rayons arrière

Afin de s'assurer que les rayons suivis contribuent à l'image que l'on souhaite générer, une astuce consiste à procéder à l'envers, en partant de l'œil et en suivant le chemin inverse des rayons. Cette méthode s'appuie sur le principe de réciprocité de Helmholtz, selon lequel la diminution de l'intensité d'un faisceau lumineux le long de sa trajectoire à travers un système optique est la même que pour un faisceau voyageant dans le sens inverse. Un rayon – ou plusieurs, pour réduire le problème de l'aliasage⁷ – est alors lancé dans la direction correspondant à chaque pixel, et son cheminement dans la scène est tracé exactement comme s'il avait été émis par un luminaire.

Le tracé de rayons arrière permet de se focaliser sur les parties de la scène comprises dans le champ visuel de l'observateur ; en effet, il peut arriver que certaines sources ne contribuent pas significativement à l'illumination d'une scène, alors qu'il est important que l'œil reçoive assez d'énergie pour former une image [Dor98]. C'est pourquoi le tracé de rayons arrière est largement plus répandu que le tracé de rayons avant, pourtant plus intuitif d'un point de vue physique, au point que la formule « tracé de rayons » désigne implicitement la méthode arrière, alors que la méthode avant a été longtemps appelée, paradoxalement, « tracé de rayons inverse » [Arv86].

Néanmoins, même si le tracé de rayons arrière est plus efficace que le tracé de rayons avant, le problème des rayons inutiles reste posé, car s'il faut parvenir jusqu'aux détecteurs dans un cas, il faut de même remonter jusqu'aux sources dans l'autre. Les trajets lumineux doivent tous avoir une source et un détecteur comme extrémités.

3.4.1.3 Rayons d'ombre

Pour s'assurer de prendre en compte la contribution lumineuse des sources lorsque le chemin d'un rayon est tracé depuis l'œil, on utilise des « rayons d'ombre » (*shadow rays*) : à chaque intersection du rayon avec une surface dans la scène, un rayon secondaire est envoyé vers chaque

7. L'aliasage est dû à la discrétisation du champ visuel ; il en résulte des images crénelées le long des frontières de zones de luminance très différentes, ou encore des images moirées.

source afin de pouvoir évaluer l'éclairement qu'elle génère à cet endroit (lorsqu'elle n'est pas occultée).

Une technique équivalente existe pour le tracé de rayons avant : à chaque interaction du rayon avec un élément de la scène, un rayon d'ombre est envoyé vers chaque détecteur afin d'évaluer la luminance générée par l'éclairage de la source émettrice à cet endroit.

3.4.1.4 Hypothèses

À l'instar de l'algorithme de radiosité, l'algorithme classique du tracé de rayons nécessite un certain nombre d'hypothèses fortes sur la scène dont l'éclairage est calculé :

- les sources sont ponctuelles ;
- les surfaces sont soit diffuses, soit spéculaires ;
- il n'y a pas d'interaction de la lumière avec le milieu.

Le tracé de rayons classique consiste alors en la suite d'opérations suivante, illustrée dans la figure 3.6(a), en page 65 :

- un rayon est lancé depuis l'œil dans chaque direction du champ de vision ;
- on teste l'intersection de ce rayon avec les différentes surfaces présentes dans la scène, et on retient la plus proche de son origine ;
- si la surface est spéculaire, le rayon est réfléchi dans une nouvelle direction selon la loi de Descartes et on teste à nouveau son intersection avec les objets de la scène, et ainsi de suite tant qu'il ne rencontre que des miroirs ;
- le rayon termine sa trajectoire lorsqu'il rencontre une surface lambertienne ; un rayon d'ombre est alors envoyé vers chaque source lumineuse pour calculer sa contribution au pixel d'origine ; cette contribution est nulle si un objet s'interpose entre l'origine du rayon d'ombre et la source.

Le tracé de rayons avant suit exactement les mêmes étapes, sauf que les rayons sont émis depuis les sources et connectés aux points d'observation lors des réflexions diffuses.

3.4.2 Extension aux milieux participants

Il existe plusieurs techniques pour prendre en compte les milieux diffusants dans l'algorithme de tracé de rayons, en fonction de la complexité des propriétés photométriques du milieu considéré [Max94].

Si le milieu est parfaitement absorbant (son albédo est nul), il suffit d'atténuer exponentiellement l'énergie transportée par les rayons en la pondérant par la transmisivité du milieu, dont l'expression est donnée par l'équation 1.12.

Si l'albédo du milieu est non nul, il est possible de tenir compte du phénomène de diffusion en échantillonnant les trajets lumineux pour lancer des rayons d'ombre en direction des sources [KONN91]. Mais comme elle ne prend pas en compte la diffusion multiple, cette méthode n'est valable que si le milieu est peu dense (la diffusion simple reste alors prépondérante par rapport à la diffusion multiple), ou si l'albédo est faible (l'absorption reste alors prépondérante par rapport à la diffusion).

3.4.3 Extension aux matériaux et aux milieux anisotropes

La gestion des propriétés photométriques des matériaux (ou du milieu) est relativement aisée, à l'aide des rayons d'ombre. En effet, connaissant les directions d'incidence et de réflexion (ou de diffusion), on peut directement tenir compte du coefficient de luminance (ou de la fonction de phase) de l'objet rencontré (ou du milieu traversé), qu'elle soit connue sous une forme tabulée issue de mesures ou sous une forme analytique issue d'un modèle [Rus97].

3.4.4 Limites et solutions

3.4.4.1 Calcul des intersections

La majeure partie du temps utilisé pour tracer des rayons est consacrée au calcul des intersections. En effet, à chaque fois qu'un rayon est lancé ou change de direction, il faut parcourir l'ensemble des objets de la scène pour tester s'il se trouve sur sa trajectoire. Ce problème a donc donné lieu à de nombreux travaux de recherche [Gla95]. Les techniques d'accélération qui en résultent se ramènent à une hiérarchisation de la scène, dans laquelle l'espace est découpé en zones de manière récursive (boîtes englobantes, *octrees*, etc.). Ainsi, on teste l'intersection d'un rayon avec des objets contenus dans une certaine région de la scène uniquement lorsque cette région se trouve sur la trajectoire du rayon, ce qui réduit considérablement le nombre de tests. Toute la difficulté consiste à déterminer la façon optimale de découper la scène. Ce problème ne constitue pas vraiment une limite de l'algorithme de tracé de rayons, mais plutôt une difficulté de mise en œuvre et une source d'optimisation.

3.4.4.2 Éclairage indirect

Le principal problème de l'algorithme classique de tracé de rayons est qu'il n'est pas physiquement réaliste car il ne prend pas en compte l'illumination indirecte due aux surfaces non spéculaires. Il sera donc impossible de représenter l'éclairage d'une surface si elle n'est pas directement éclairée par une source. Au départ, ce problème était grossièrement compensé par l'utilisation d'un terme ambiant, consistant à ajouter à la scène une sorte d'éclairage global et uniforme. La véritable prise en compte de l'éclairage global a été introduite par la technique du tracé de rayons distribués [CPC84] : à chaque intersection avec une surface non spéculaire, on échantillonne l'espace des directions en générant une distribution uniforme de rayons réfléchis, dont on suit la trajectoire de manière récursive (figure 3.6(b), en page 65). Le chemin d'un rayon s'arrête lorsqu'il sort de la scène ou qu'il est absorbé. On peut également fixer une limite arbitraire au nombre d'interactions successives, mais cela biaise le résultat. Pour prendre en compte les matériaux autres que spéculaires ou lambertiens, il suffit de tenir compte de la réflectance bidirectionnelle pour générer la distribution des directions de réflexion. Le problème est que cette méthode accroît considérablement le nombre de chemins lumineux tracés dans la scène.

3.4.4.3 Tracé de rayons stochastique

Pour réduire le nombre de rayons à suivre dans la scène, il existe plusieurs procédés. Le plus simple consiste à fixer arbitrairement une limite au nombre d'interactions ; mais cette solution

introduit un biais dans le résultat. Le meilleur moyen est d'utiliser une approche probabiliste, de type Monte-Carlo [LPS98]. Suggérée par Kajiya [Kaj86], l'algorithme du « tracé de chemins » consiste à établir le cheminement de chaque rayon par une série de tirages aléatoires non uniformes en utilisant les caractéristiques photométriques des éléments de la scène comme fonctions de densité de probabilité ; à chaque intersection, on choisit ainsi une nouvelle direction « probablement » suivie par le rayon, plutôt que d'en générer plusieurs (figure 3.6(c)). Appliquée au tracé de rayons avant, cette méthode prend le nom de « tracé de photons » (figure 3.6(d)).

L'extension pour prendre en compte un milieu diffusant consiste simplement à ajouter un tirage aléatoire basé sur la densité du milieu pour décider de la distance parcourue avant que le rayon soit diffusé [Bri89].

En fait, le tracé de rayons stochastique est la méthode de simulation privilégiée par les scientifiques qui cherchent une méthode physique pour simuler précisément la propagation de la lumière dans un milieu diffusant, tel que l'atmosphère [BDIZ93, ATI97]⁸. En effet, elle permet de tenir compte de diffusions (et de réflexions) multiples et anisotropes, contrairement aux techniques déterministes qui imposent des hypothèses simplificatrices. L'inconvénient majeur de la méthode de Monte-Carlo est qu'elle génère un bruit important dans l'image calculée. De ce fait, elle a donné lieu à de nombreuses recherches visant à réduire la variance dans les résultats. La thèse de Veach [Vea97] établit une description détaillée des techniques de Monte-Carlo appliquées à la synthèse d'images, et l'état de l'art réalisé par Szirmay-Kalos [SK98] permet de comparer les différentes méthodes.

3.4.4.4 Tracé de rayons bidirectionnel

Il est également possible de combiner les avantages des tracés de rayons avant et arrière, par la technique du tracé de chemins bidirectionnel [Laf96] : des rayons sont émis à la fois depuis les sources et depuis le point de vue, leurs trajectoires étant construites de manière stochastiques et connectées à chaque interaction par un rayon d'ombre, comme indiqué dans l'exemple de la figure 3.6(e) ; on utilise ainsi deux chemins aléatoires (le direct et l'inverse) pour en générer plusieurs autres en les interconnectant, et en pondérant les contributions respectives de chaque chemin par les densités de probabilité utilisées pour le construire. Cette méthode est facilement applicable aux milieux participant [LW96]. Elle permet de réduire considérablement le bruit inhérent à la méthode de Monte-Carlo, à condition d'appliquer judicieusement certaines techniques d'échantillonnage [VG95].

8. On distingue les méthodes « purement Monte-Carlo » et « semi-Monte-Carlo », selon qu'il est ou non fait usage de la composante déterministe introduite par les rayons d'ombre. Seule la deuxième approche permet de générer des images.

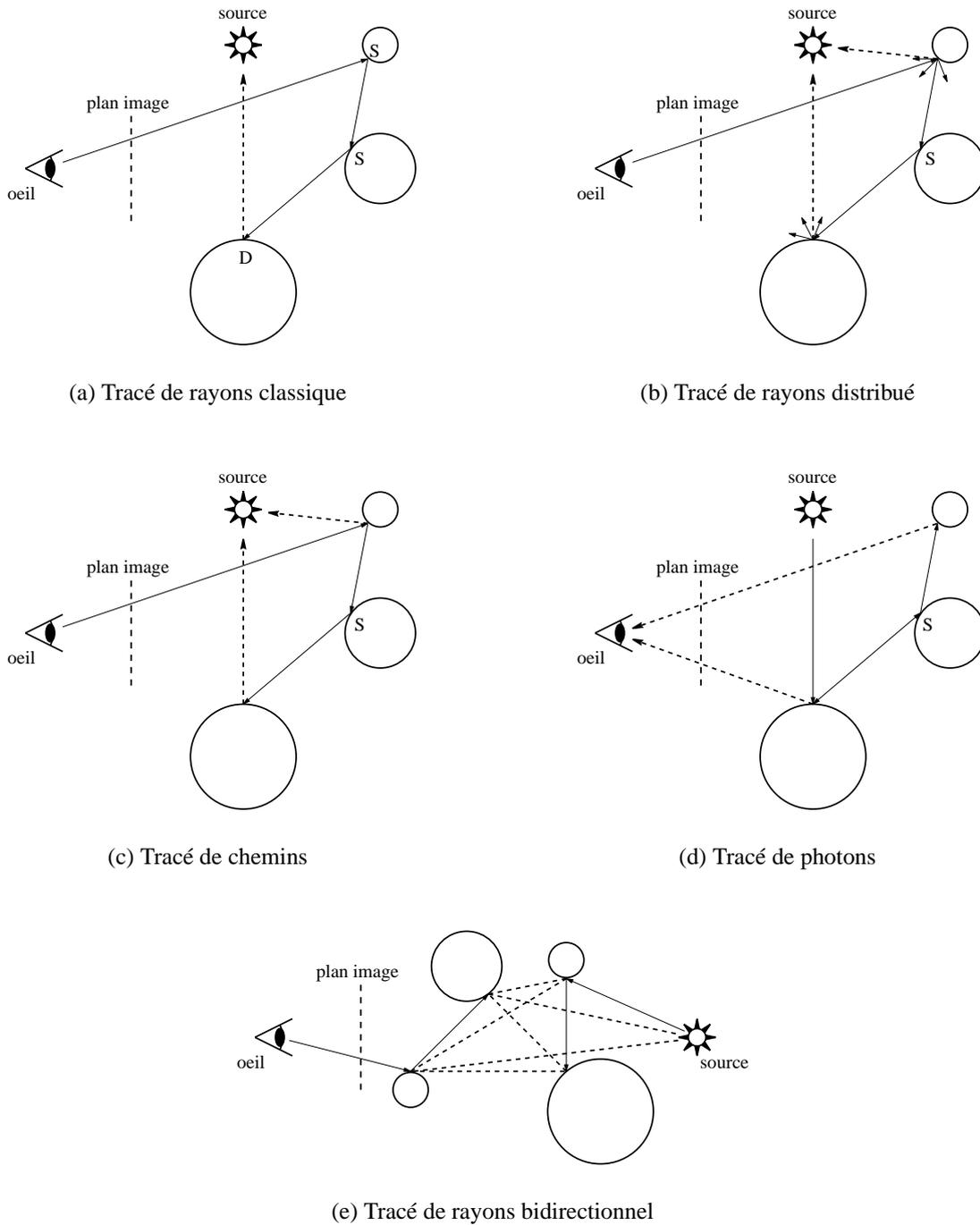


FIG. 3.6 – Schémas illustrant le principe des différents algorithmes de tracé de rayons (adapté d'après [SK98]). Les rayons de propagation sont figurés en traits continus, et les rayons d'ombre en traits tiretés. Le symbole S désigne une interaction spéculaire ; le symbole D désigne une interaction diffuse ; et l'absence de symbole désigne une interaction quelconque, caractérisée par une BRDF.

3.5 Méthodes hybrides

3.5.1 Combinaisons de la radiosité et du tracé de rayons

Les deux types d'algorithme qui viennent d'être décrits sont relativement complémentaires. En effet, la radiosité a l'avantage de fournir une solution indépendante du point de vue, alors que le tracé de rayons nécessite de fixer la position de l'observateur ; en outre, la radiosité est plus adaptée à la simulation des réflexions (et des diffusions) multiples mais isotropes, alors que le tracé de rayons est conçu à l'origine pour simuler de multiples réflexions spéculaires dans le vide. Certains ont donc combiné les deux algorithmes afin de profiter de leurs avantages respectifs, ce qui a donné naissance aux méthodes hybrides de rendu [NN95]. Les algorithmes correspondant à ces méthodes se décomposent en plusieurs étapes mettant en œuvre soit la radiosité, soit le tracé de rayon, ce qui fait qu'on les désigne souvent sous le nom d'algorithmes « multipasses » [Gla95]. Généralement, la radiosité est utilisée d'abord pour évaluer les échanges diffus, et elle est suivie d'un tracé de rayons pour tenir compte des effets spéculaires. En fait, il existe pratiquement autant de techniques qu'il y a de codes, chacun choisissant pour chaque passe les algorithmes les mieux à même de décrire les phénomènes auxquels il s'intéresse plus particulièrement [Gla95]. En ce qui concerne la gestion de la diffusion anisotrope multiple par un milieu participant, parmi les techniques passées en revue par Pérez *et al.* [PPS97], on peut retenir les travaux sur la radiosité stochastique de Schlick *et al.* [Sch92, BSS94], ainsi que ceux de Nishita *et al.* [NDN96] appliqués à la simulation de la diffusion atmosphérique.

3.5.2 Cartes de photons

La méthode des « cartes de photons » (*photon maps*), plus récemment introduite par Jensen [Jen96], est différente des méthodes multipasses précédemment présentées car elle n'utilise pas la radiosité à proprement parler. Il s'agit d'une méthode en deux passes. La première permet d'évaluer l'éclairage global de la scène en utilisant le tracé de photons stochastique, et en conservant un historique des interactions des photons avec les éléments non spéculaires de la scène (qui n'a pas besoin d'être maillée) : la carte des photons. La deuxième passe permet de générer l'image par un tracé de rayons bidirectionnel stochastique, utilisant la carte de photons pour optimiser l'échantillonnage aléatoire des directions de propagation et pour réduire le nombre de rayons d'ombre. Cet algorithme est parfaitement adaptable au traitement de la diffusion multiple et anisotrope dans les milieux dispersés [JC98]. La mise en œuvre décrite par Jensen fait un certain nombre d'approximations pour accélérer les calculs en limitant la taille des cartes de photons, mais il semble possible de privilégier une précision physique très poussée (au prix d'une lenteur accrue) en stockant toutes les interactions surfaciques et volumiques des photons.

3.6 Choix d'une méthode de synthèse d'images

Ainsi qu'il a été présenté, la radiosité et le tracé de rayons sont des approches complémentaires, ce qui explique le développement des méthodes hybrides. Mais le problème de la radiosité, et plus encore de la radiosité généralisée, est qu'elle impose un découpage surfacique et volumique de la scène. Au-delà de consommation très importante d'espace mémoire que cela implique, il s'en suit que les hautes fréquences spatiales sont traitées de façon imprécise, particulièrement en présence de réflexions ou de diffusions fortement directionnelles [Shi94]. Or l'usage visé ici est précisément d'étudier les variations de contraste en fonction des fréquences spatiales dans l'image d'un objet transmise à travers le brouillard. Il semble donc judicieux d'exclure l'utilisation de la radiosité, ainsi que les techniques hybrides basées sur cette méthode.

Il est donc préférable d'utiliser les algorithmes de tracé de rayons, parmi lesquels on peut inclure la technique des cartes de photons. L'approche stochastique est indispensable pour optimiser le calcul des trajectoires des rayons tout en prenant en compte les propriétés photométriques des sources, des surfaces et du milieu. Dans un souci de simplicité et de souplesse, il est préférable d'exclure les techniques impliquant une implémentation complexe, afin de s'assurer de la maîtrise des phénomènes physiques simulés. On est ainsi amené à écarter les méthodes bidirectionnelles, ce qui nous limite au choix entre le tracé de chemins et le tracé de photons. Ces algorithmes ont l'avantage d'être relativement aisés à mettre en œuvre tout en respectant les lois physiques régissant les interactions multiples et anisotropes de la lumière avec la scène, avec un minimum d'hypothèses simplificatrices (celles qui sont nécessaires à l'écriture de l'équation de transfert radiatif 3.14, en page 55).

Le tracé de chemins est susceptible de générer des images avec un bruit plus faible, mais implique d'effectuer autant de simulations qu'il y a de points de vue. Étant donné qu'on est amené par la suite à étudier l'évolution du signal visuel transmis à travers le brouillard en fonction de la distance d'observation, il semble plus pertinent d'utiliser le tracé de photons, qui permet de gérer de multiples détecteurs au cours d'une unique simulation, une fois que les caractéristiques de la scène (celles du milieu notamment) sont fixées.

3.7 Conclusion

L'inventaire des différentes méthodes pour prendre en compte les milieux diffusants en synthèse d'images nous amène à la conclusion que l'approche stochastique de type tracé de photons est la mieux adaptée pour le calcul de l'image d'un signal lumineux transmis à travers le brouillard en vue de son analyse fréquentielle.

Ce choix est conforté par le fait que la méthode du tracé de rayons avant, associée à la méthode de Monte-Carlo, est très largement utilisée au sein de la communauté scientifique qui s'intéresse aux effets de la propagation de la lumière dans l'atmosphère [BMGG92, BDIZ93, PCG⁺96, ATI97].

On a donc mis en œuvre la technique retenue, en réalisant un code de simulation de la propagation de la lumière dans le brouillard par diffusion anisotrope multiple permettant de calculer la distribution de luminance dans le champ visuel d'un observateur.

SECONDE PARTIE

Chapitre 4

Méthode du tracé de photons semi-Monte-Carlo appliquée à la synthèse d'images dans le brouillard

Les précédents chapitres ont permis d'identifier que la microstructure du brouillard était susceptible d'influer sur la visibilité dans l'environnement visuel d'un usager de la route, d'établir que cette influence devait être liée à des perturbations du contraste dans le signal visuel, et de choisir une technique de synthèse d'images permettant de simuler des mesures de ce signal dans le brouillard. Il reste donc à mettre en œuvre cette technique en concevant un code de simulation de la diffusion multiple et anisotrope de la lumière dans un milieu diffusant homogène permettant de calculer la distribution de luminance dans le champ visuel d'un observateur. Il sera alors possible d'entamer l'étude du filtrage fréquentiel du contraste par le brouillard en analysant les perturbations induites par la diffusion dans cette image.

Le présent chapitre décrit la mise au point du code de simulation, basé sur le principe de l'algorithme de tracé de photons semi-Monte-Carlo. La procédure permettant de simuler la propagation de la lumière dans le brouillard est d'abord détaillée. La technique permettant de capter le flux transporté pour simuler une mesure de luminance est ensuite décrite. Les résultats de différents tests de validation auxquels le code a été soumis sont finalement présentés.

4.1 Propagation de la lumière

Selon l'approche du tracé de photons, le rayonnement lumineux des sources est décomposé en éléments de flux, appelés abusivement « photons », dont on suit le cheminement à travers la scène de manière probabiliste en se basant sur les lois physiques d'émission, de réflexion et de diffusion, par application de la méthode de Monte-Carlo. Le nombre de photons doit être suffisamment important pour représenter de manière significative les échanges lumineux dans la scène. Cette approche permet de prendre en compte les caractéristiques photométriques des sources lumineuses, des surfaces et du milieu diffusant.

Chaque photon transporte un flux élémentaire constant jusqu'à ce qu'il soit absorbé ou qu'il sorte des limites de la scène. Sa trajectoire débute systématiquement par une émission depuis une source lumineuse ; elle peut ensuite être infléchie par réflexion sur la surface d'un des objets présents dans la scène, ou bien par diffusion par une des particules dont est constitué le milieu. À chaque évènement, une nouvelle direction de propagation est calculée par application de la méthode d'échantillonnage par importance [PGMR98], et l'énergie lumineuse transmise à chacun des détecteurs placés dans la scène est évaluée de façon déterministe. Entre deux évènements, la trajectoire des photons est rectiligne. La méthode de la « roulette russe » [CC75] est appliquée pour décider si le photon est absorbé lors de son interaction avec une surface ou avec une particule, ou bien s'il continue de cheminer à travers la scène.

Par la suite, le terme « propagation » servira à désigner l'émission, la réflexion ou la diffusion selon le type d'évènement considéré sur la trajectoire d'un photon.

4.1.1 Prise en compte des propriétés photométriques

Pour pouvoir tenir compte des propriétés photométriques des éléments de la scène lors du calcul d'une direction de propagation pour un photon, la connaissance de la distribution goniométrique des intensités I émises, réfléchies ou diffusées est nécessaire. Excepté pour dans le cas de l'émission, où l'incidence n'existe pas, cette fonction dépend à la fois des directions d'incidence $\vec{\omega}_i$ et de propagation $\vec{\omega}_p$ du flux lumineux transporté par le photon.

4.1.1.1 Propagation directionnelle

Lors d'un évènement sur la trajectoire d'un photon, le flux $d\Phi_p$ qui se propage dans un angle solide donné $d\omega_p$ autour de la direction $\vec{\omega}_p$ est lié à l'intensité $I(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_p)$:

$$d\Phi_p = I(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_p) d\omega_p \quad (4.1)$$

On peut en déduire la probabilité pour un photon issu de la direction $\vec{\omega}_i$ de poursuivre sa trajectoire dans la direction $\vec{\omega}_p$:

$$dp(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_p) = \frac{I(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_p) d\omega_p}{\int_{\vec{\omega} \in \Omega} I(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}) d\omega(\vec{\omega})} \quad (4.2)$$

où Ω est le domaine spatial de propagation lié à l'évènement considéré. Ainsi, la distribution goniométrique normalisée fournit directement la fonction qui détermine la densité de probabilité de propagation pour l'échantillonnage par importance.

4.1.1.2 Échantillonnage par importance

La méthode de Monte-Carlo permet de simuler le comportement d'un système physique décrit par des fonctions de densité de probabilité. Considérons une variable aléatoire positive X dont les valeurs x sont distribuées selon une densité de probabilité $f(x)$. La probabilité pour que X prenne une valeur comprise entre x et $x + dx$ est alors égale à $f(x)dx$.

Pour échantillonner aléatoirement X dans un intervalle donné, le plus simple est d'utiliser la méthode de rejet [HH64]. On effectue d'abord un tirage aléatoire uniforme d'une valeur x dans l'intervalle considéré. On procède ensuite au tirage aléatoire uniforme d'une valeur r dans l'intervalle $[0, 1[$, que l'on compare à $f(x)$. La valeur x est acceptée si la condition suivante est vérifiée :

$$r \leq f(x) \quad (4.3)$$

Sinon, la valeur x est rejetée. Il faut alors procéder à un nouveau tirage, et ce jusqu'à ce que la condition 4.3 soit vérifiée.

La méthode de rejet génère donc des calculs inutiles, et il est plus efficace d'utiliser l'échantillonnage par importance. Cette méthode repose sur l'échantillonnage aléatoire de la fonction de densité de probabilité cumulée :

$$F(x) = \int_0^x f(u)du \quad (4.4)$$

qui représente la probabilité pour que la variable X prenne une valeur inférieure ou égale à x . En pratique, il suffit de procéder au tirage aléatoire d'une valeur r dans l'intervalle $[0, 1[$, puis de résoudre l'équation suivante :

$$F(x) = r \quad (4.5)$$

ce qui implique d'inverser la fonction F . On utilise le fait que les valeurs $F^{-1}(r)$ sont distribuées selon la fonction de densité de probabilité f . Cette méthode est illustrée en figure 4.1.

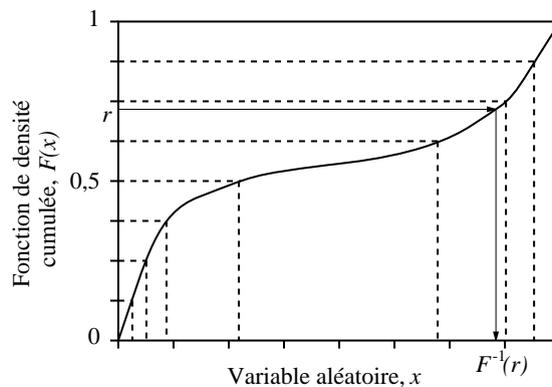


FIG. 4.1 – Pour l'échantillonnage par importance d'une variable aléatoire X de densité de probabilité cumulée F , on procède au tirage aléatoire d'une valeur r dans l'intervalle $[0, 1[$, puis on calcule $F^{-1}(r)$.

4.1.2 Émission

Chacune des n sources lumineuses éclairant la scène est caractérisée par un solide photométrique et un flux $\Phi_{s \in [1, n]}$. Ces informations sont utilisées pour définir l'origine et la direction d'émission de chaque photon. On commence par choisir aléatoirement une source lumineuse en fonction de la répartition des flux, puis on choisit une direction d'émission en utilisant le solide photométrique comme densité de probabilité de propagation. Les N photons lancés pour une simulation transportent tous le même flux élémentaire $d\Phi$:

$$d\Phi = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^n \Phi_s \quad (4.6)$$

Cette méthode progressive permet de visualiser la convergence au fur et à mesure de la simulation. Toutefois, il est possible, et parfois souhaitable, de lancer une simulation par source, et de sommer les résultats partiels pour obtenir le résultat global.

4.1.3 Libre parcours

Au sein d'un milieu participant, la probabilité pour un photon de traverser une distance z sans interagir avec les particules diffusantes est donnée par la transmissivité e^{-Kz} , K étant le coefficient d'extinction du milieu. En conséquence, la probabilité pour un photon d'être diffusé entre z et $z + dz$ est la suivante :

$$dp_t(z) = e^{-Kz} (1 - e^{-Kdz}) \quad (4.7)$$

soit, en utilisant le premier terme du développement de Taylor :

$$dp_t(z) \simeq K e^{-Kz} dz \quad (4.8)$$

Cette expression est employée comme densité de probabilité pour échantillonner le libre parcours du photon.

Sur ce parcours, le photon est susceptible de rencontrer une surface. Pour le savoir, il est nécessaire de calculer l'intersection de la trajectoire du photon avec tous les éléments de la scène, décrite par un ensemble de faces triangulaires. Cette phase peut être extrêmement longue si la scène est complexe. Certaines techniques simples (telles que les boîtes englobantes [Gla95]) permettent de l'accélérer quelque peu, sans qu'on puisse dire que le code a été optimisé de ce point de vue.

Si aucune réflexion n'a lieu sur ce parcours, et étant donné que le brouillard est supposé non-absorbant, le photon est alors diffusé.

4.1.4 Diffusion

La distribution goniométrique associée à la diffusion est la fonction de phase du brouillard, $P(\theta)$, où θ est l'angle entre la direction de diffusion $\vec{\omega}_p$ et à la direction incidente $\vec{\omega}_i$:

$$I_d(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_p) = \frac{1}{4\pi} P(\cos^{-1}(-\vec{\omega}_i \cdot \vec{\omega}_p)) \quad (4.9)$$

Lorsqu'un photon subit un événement de type diffusion, sa nouvelle direction est choisie par tirage aléatoire sur la base de cette densité de probabilité de propagation :

$$dp_d(\theta) = \frac{1}{2}P(\theta) \sin \theta d\theta \quad (4.10)$$

Étant donné que les gouttelettes de brouillard sont sphériques, la diffusion est symétrique autour de la direction incidente. Le second angle nécessaire à la détermination de la direction de diffusion peut donc être calculé par un simple tirage aléatoire uniforme sur $[0, 2\pi[$.

4.1.5 Réflexion

Suivant la règle de la roulette russe, lorsqu'un photon rencontre une surface sur son parcours, un tirage aléatoire permet de décider s'il doit être réfléchi ou absorbé, selon le facteur de réflexion du matériau dont est constituée la surface. En cas d'absorption, la trajectoire du photon est terminée, et un nouveau photon est lancé.

Le calcul d'intersection permet non seulement de déterminer si le parcours du photon croise une surface, mais également de déterminer les coordonnées du point d'intersection, ainsi que la normale \vec{n} à la surface en ce point. Cette information est utile pour calculer une nouvelle direction de propagation $\vec{\omega}_p$ par un tirage aléatoire basé sur la fonction de réflectance bidirectionnelle (BDRF) du matériau dont est constituée la surface.

Bien qu'il soit possible de prendre en compte tout type de BRDF¹, le code de simulation présenté est surtout destiné à étudier le phénomène de diffusion par le milieu ; on s'est donc limité aux surfaces lambertiennes, en vue des tests de validation qui seront abordés dans la partie 4.3. L'intensité réfléchie suit alors la loi de Lambert, qui est indépendante de la direction d'incidence $\vec{\omega}_i$:

$$I_r(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_p) = I_0 \cos \theta \quad (4.11)$$

où θ est l'angle entre $\vec{\omega}_p$ et la normale \vec{n} , et I_0 est l'intensité réfléchie dans la direction normale à la surface. On en déduit, d'après 4.2 :

$$dp_r(\theta) = \frac{1}{\pi} \cos \theta d\omega_p(\theta) \quad (4.12)$$

$$= 2 \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (4.13)$$

Cette expression est employée comme densité de probabilité de propagation pour échantillonner la direction de réflexion.

La réflexion diffuse étant symétrique autour de la normale à la surface, le second angle nécessaire à la détermination de la direction de réflexion peut être calculé par un simple tirage aléatoire uniforme sur $[0, 2\pi[$.

1. Les matériaux que l'on rencontre habituellement dans l'infrastructure (chaussée, marquages, panneaux, etc.) et sur les véhicules (peinture, vitres, etc.) comportent généralement une composante spéculaire non négligeable.

4.2 Simulation de mesures photométriques

4.2.1 Description des détecteurs

Pour générer une image de la scène, on utilise un ou plusieurs appareils virtuels de prise de vues numériques, qu'on désigne plus commodément sous le terme de « caméra ». Comme le montre la figure 4.2, chaque caméra est définie par un certain nombre de paramètres :

- la position,
- la visée $\vec{\omega}_v$,
- l'angle d'ouverture horizontal α ,
- le nombre de pixels par ligne et colonne N_{pix} .

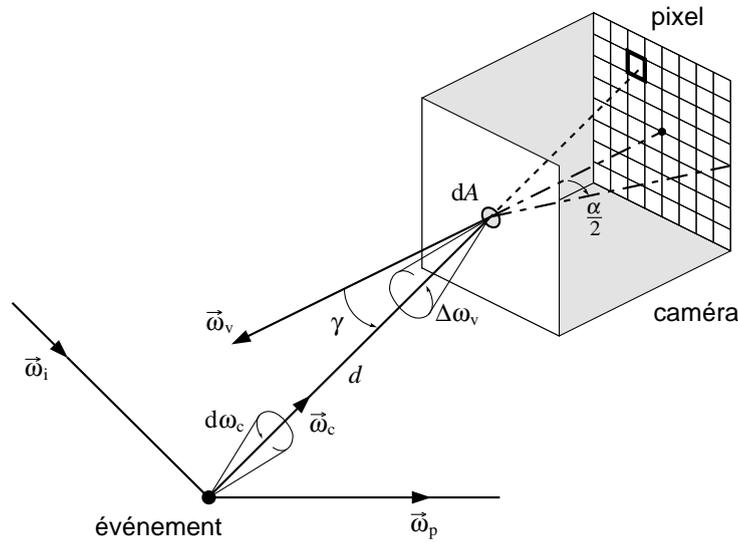


FIG. 4.2 – Paramètres géométriques du calcul de la luminance recueillie par une « caméra » à chaque événement (émission, réflexion, diffusion) sur la trajectoire d'un photon.

Dans le cadre des présents travaux, le besoin est de calculer des images sous la forme de distributions de luminance. Les caméras fonctionnent donc à la manière de photomètres. En fait, chaque élément d'image, ou pixel, est un luminancemètre qui utilise le diaphragme (l'équivalent de la pupille de l'œil) comme détecteur et qui intègre le flux entrant issu de toutes les directions $\vec{\omega}_c$ comprises dans le champ couvert par l'ouverture. En considérant que α est petit par rapport à N_{pix} , on donne l'expression suivante pour l'élément d'angle solide de réception de chaque pixel :

$$\Delta\omega_v = \left(\frac{2 \tan \frac{\alpha}{2}}{N_{\text{pix}}} \right)^2 \cos^3 \gamma \quad (4.14)$$

où γ est l'angle entre la direction de contribution $\vec{\omega}_c$ et la direction de visée $\vec{\omega}_v$: $\cos \gamma = -\vec{\omega}_c \cdot \vec{\omega}_v$.

Dans le cas où l'on a simplement besoin d'une valeur de luminance dans une direction donnée, on utilise une caméra dotée d'un unique pixel circulaire, pour modéliser au mieux un luminancemètre réel. Dans ce cas, l'expression de l'angle solide de réception est plus simple :

$$\Delta\omega_v = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.15)$$

4.2.2 Contribution lumineuse des photons

Pour recueillir le flux transporté par les photons, on utilise la technique d'estimation de l'événement suivant décrite par Dutré *et al.* [DLW93]. À chaque événement qui se produit sur la trajectoire d'un photon, on trace un rayon d'ombre vers chaque détecteur, afin d'évaluer la probabilité dp_c pour le photon d'atteindre le détecteur. Celle-ci est déterminée à partir de deux composantes :

- la fonction de probabilité de propagation $I(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_c) d\omega_c$, qui est liée à la nature de l'événement, et qui donne la probabilité pour le photon d'infléchir sa trajectoire dans la direction du détecteur ;
- la transmissivité e^{-Kd} du milieu entre les positions respectives de l'événement et du détecteur, qui indique la probabilité pour le photon d'atteindre le détecteur sans être diffusé.

$$dp_c = e^{-Kd} I(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_c) d\omega_c \quad (4.16)$$

où $d\omega_c$ est l'angle solide entre le point d'origine de la contribution et le diaphragme du détecteur, dont l'aire dA est supposée petite par rapport à la distance d :

$$d\omega_c = \frac{dA \cos \gamma}{d^2} \quad (4.17)$$

Si l'événement est dans le champ de vision du détecteur, et si aucun objet ne s'interpose entre les deux, le flux $\Delta\Phi$ transporté par le photon, pondéré par la probabilité de contribution dp_c , contribue alors à la luminance « mesurée » au niveau du pixel pointé par le rayon de contribution.

4.2.3 Calcul de la luminance

En utilisant les lois de base de la photométrie [DeC97] rappelée dans la section 3.1.1, il est ainsi possible de calculer la distribution de luminance recueillie par le détecteur. Chaque événement contribue à accroître l'éclairement E d'un pixel par une portion de son élément de flux :

$$\Delta E = \frac{dp_c \Delta\Phi}{dA} \quad (4.18)$$

De l'éclairement, on déduit la luminance dans la direction visée par le pixel :

$$L = \frac{\Delta E}{\Delta\omega_v} \quad (4.19)$$

soit, d'après les équations 4.16 à 4.19 :

$$L = \frac{e^{-Kd}}{d^2} I(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_c) \cos \gamma \frac{\Delta \Phi}{\Delta \omega_v} \quad (4.20)$$

La valeur finale de la luminance du pixel résulte de la sommation progressive de l'ensemble des contributions. On note qu'elle est indépendante de l'aire dA de l'ouverture du sténopé.

4.2.4 Exemple de simulation

On a testé la méthode de simulation présentée avec une scène routière composée d'une portion de route à deux fois deux voies avec terre-plein central, avec un portique sur lequel est fixée un panneau lumineux de limitation de vitesse à 50 km/h. Outre ce panneau, la scène contient quatre sources lumineuses : les projecteurs du véhicule de l'observateur et ceux d'un véhicule croisé.

Trois caméras (ouverture 45° , définition 256×256) ont été disposées en différents endroits : la première au niveau du regard du conducteur, la seconde 10 m plus loin avec la même visée, et la troisième 40 m plus loin de l'autre côté du terre-plein et regardant dans le sens inverse.

On a procédé à une série de quatre simulations : la première sans brouillard, la seconde en utilisant un brouillard théorique parfaitement isotrope, et les deux dernières avec des granulométries de brouillard possédant des modes de distribution respectifs de $1 \mu\text{m}$ et $10 \mu\text{m}$ de diamètre. Dans les trois derniers cas, le coefficient d'extinction a été fixé à $0,15 \text{ m}^{-1}$ pour obtenir une visibilité météorologique de 50 m. Les résultats sont présentés en annexe B, page 160, sous forme de cartes d'iso-luminance.

L'observation de ces images nous amène à vérifier d'une part l'influence de la granulométrie du brouillard sur l'environnement visuel du conducteur, et de constater d'autre part le problème du bruit, inhérent à l'approche de Monte-Carlo.

4.3 Validation du code de simulation

Pour tester la validité et la précision du code de simulation développé, on l'a d'abord mis en œuvre dans des situations relativement simples, rendant toutes les grandeurs photométriques accessibles par calcul analytique. Dans un deuxième temps, on a fait intervenir un milieu diffusant, et comparé les résultats avec ceux fournis par un code validé utilisant une technique purement Monte-Carlo. Enfin, on a calculé des images du halo de diffusion d'une source lumineuse dans le brouillard, que l'on a comparées à des mesures réalisées en brouillard artificiel.

4.3.1 Comparaison analytique : réflexion simple

Dans un premier temps, on a modélisé la procédure d'étalonnage d'un luminancemètre. Ce cas très simple permet en effet de vérifier que le luminancemètre virtuel du code de simulation « fonctionne » correctement.

4.3.1.1 Description de la procédure

Cette procédure consiste à éclairer perpendiculairement une plaque d'un matériau parfaitement diffusant avec une lampe standard, pour ensuite mesurer la luminance réfléchie dans une direction donnée faisant un angle d'environ 45° par rapport à la normale à la surface.

Connaissant les propriétés photométriques de ces différents éléments, la luminance ainsi mesurée peut être comparée à sa valeur attendue, calculée analytiquement :

$$L = \frac{\rho \Phi}{\pi \Omega d^2} \quad (4.21)$$

où ρ est le facteur de réflexion du matériau diffusant, Φ est le flux émis par la lampe dans l'angle solide Ω et d est la distance entre la lampe et la surface.

Si la luminance mesurée est différente de la luminance calculée, il faut alors modifier le gain de l'appareil de mesure pour ajuster l'étalonnage.

4.3.1.2 Simulation de la procédure

Pour la simulation, plusieurs luminancemètres ont été disposés dans différentes positions avec différentes ouvertures autour de la plaque réfléchissante, comme le montre la figure 4.3. Théoriquement, la surface étant lambertienne, tous les luminancemètres mesurent la même luminance, donnée par l'équation 4.21.

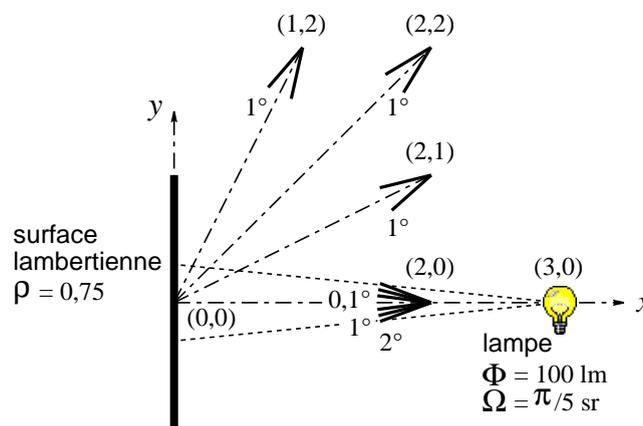


FIG. 4.3 – Position et ouverture des détecteurs pour tester le code de tracé de photons semi-Monte-Carlo en réflexion simple.

Les graphes de la figure 4.4 permettent de vérifier la précision des résultats en fonction du nombre de photons lancés. Le graphe 4.4(a) montre l'influence importante de l'ouverture des détecteurs sur la vitesse de convergence ; cet effet est similaire à l'influence de la surface des détecteurs pour une simulation basée sur une méthode purement Monte-Carlo [PCG⁺96].

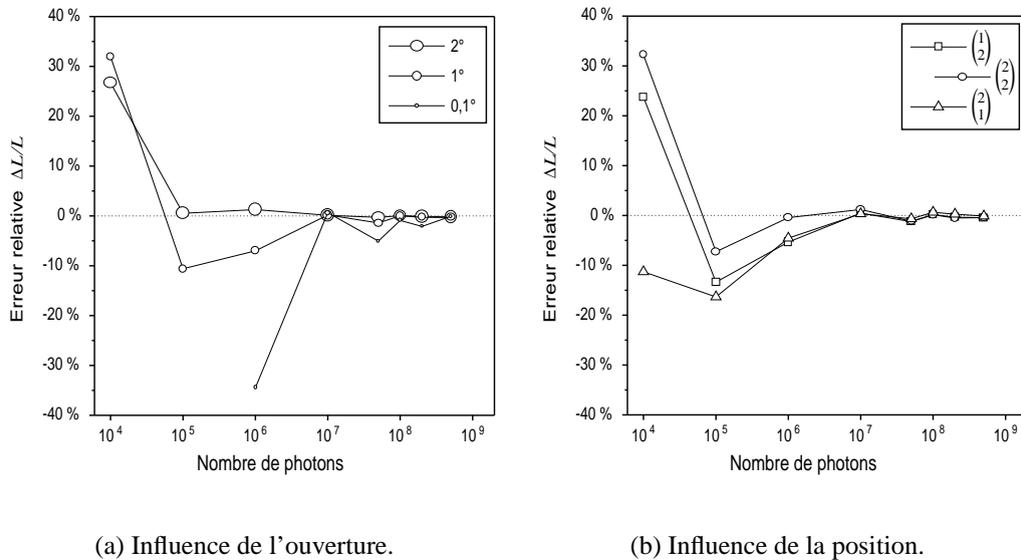


FIG. 4.4 – Résultats du test du code de tracé de photons semi-Monte-Carlo en réflexion simple : l'écart relatif entre les valeurs de luminance obtenues par simulation et par calcul analytique est tracé en fonction du nombre de photons lancés, pour différentes ouvertures (a) et différentes positions (b) du luminancemètre.

4.3.2 Comparaison analytique : réflexions multiples

Le problème se complique lorsqu'on veut valider le code au-delà du premier ordre, c'est-à-dire en tenant compte de réflexions multiples. Il faut modéliser une scène dans laquelle le calcul analytique d'une luminance est possible. C'est pourquoi on s'est placé dans le cas d'une source isotrope émettant au centre d'un sphère intégratrice², dont la paroi réfléchit la lumière de façon lambertienne.

4.3.2.1 Description de la scène

On considère une sphère creuse de rayon intérieur R au centre de laquelle on place une source lumineuse ponctuelle (figure 4.5). On distribue à l'intérieur de cette sphère un certain nombre de luminancemètres, afin de vérifier qu'ils mesurent tous la même valeur de luminance. La paroi interne de la sphère est constituée d'un matériau lambertien de facteur de réflexion ρ . La source lumineuse émet un flux Φ_0 de manière isotrope. Les luminancemètres ont différentes ouvertures α_i , afin de tester la convergence de la simulation.

2. Appareil de laboratoire permettant de mesurer le flux d'une source.

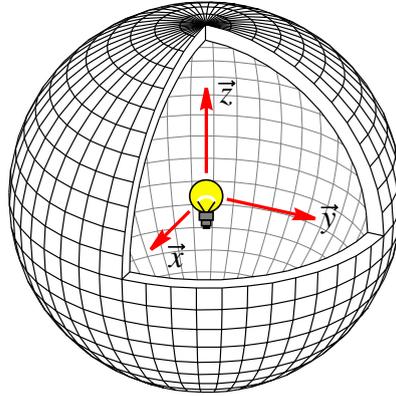


FIG. 4.5 – Géométrie de la scène utilisée pour tester le code de tracé de photons semi-Monte-Carlo en réflexions multiples.

4.3.2.2 Calcul analytique

À l'ordre 0, l'énergie lumineuse est émise par la source. Le flux Φ_0 ainsi émis est entièrement et uniformément capté par la paroi interne de la sphère³.

Le matériau absorbe une partie de l'énergie et réfléchit le reste en un flux Φ_1 (réflexion d'ordre 1) :

$$\Phi_1 = \rho \Phi_0 \quad (4.22)$$

Du fait de la symétrie particulière de la scène, ce flux est également capté entièrement et uniformément par la paroi, qui réfléchit alors un flux Φ_2 (réflexion d'ordre 2) :

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= \rho \Phi_1 \\ &= \rho^2 \Phi_0 \end{aligned} \quad (4.23)$$

En poursuivant le raisonnement par récurrence, on peut exprimer le flux réfléchi par la paroi à l'ordre n sous la forme d'une suite géométrique de raison ρ :

$$\begin{aligned} \Phi_n &= \rho \Phi_{n-1} \\ &= \rho^n \Phi_0 \end{aligned} \quad (4.24)$$

Le flux total Φ_r reçu par la paroi interne de la sphère est la somme des flux Φ_n à tous les ordres n de zéro à l'infini.

$$\begin{aligned} \Phi_r &= \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_n \\ &= \frac{\Phi_0}{1 - \rho} \end{aligned} \quad (4.25)$$

3. La source et les détecteurs étant immatériels, ils ne perturbent pas la propagation de l'énergie lumineuse.

Le flux Φ_r est uniformément distribué sur toute la paroi. Ainsi chaque élément ds de la surface interne de la sphère, dont l'aire totale est $S = 4\pi R^2$, reçoit un flux $d\Phi_r$ en proportion ds/S du flux total. On peut donc calculer l'éclairement E reçu par cet élément de surface :

$$\begin{aligned} E &= \frac{d\Phi_r}{ds} \\ &= \frac{\Phi_r}{S} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Sachant que la paroi est constituée d'un matériau lambertien, la luminance L de la surface est indépendante de la direction d'observation :

$$L = \frac{\rho}{\pi} E \quad (4.27)$$

D'après les équations (4.25), (4.26) et (4.27), on exprime analytiquement la luminance en tout point de la paroi interne de la sphère en fonction des paramètres d'entrée :

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho} \frac{\Phi_0}{4\pi^2 R^2} \quad (4.28)$$

4.3.2.3 Comparaison entre calcul et simulation

La scène décrite précédemment a été modélisée afin de simuler les échanges lumineux par réflexions multiples, le but étant de mesurer la luminance de la paroi interne de la sphère et de comparer le résultat avec la valeur L_a fournie par l'expression analytique (4.28).

Dans un premier temps, des valeurs numériques ont été fixées arbitrairement pour les paramètres en entrée du code de simulation (tableau 4.1), afin de calculer analytiquement la luminance de la paroi de la sphère avec l'équation 4.28.

R	rayon de la sphère	5 m
ρ	facteur de réflexion du matériau	0,5
Φ_0	flux émis par la source	100 W
L_a	luminance calculée	0,101 W.sr ⁻¹ .m ⁻²

TAB. 4.1 – Valeurs numériques des paramètres de la scène de la sphère creuse, utilisée pour valider le code de tracé de photons semi-Monte-Carlo dans le cas des réflexions multiples.

On a ensuite simulé la propagation de 10^9 photons, avec trois luminancemètres disposés au centre de la sphère et visant chacun avec une ouverture de 3° dans une des directions principales du repère de coordonnées $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$. On a ainsi vérifié que la luminance de la paroi interne de la sphère était uniforme, en constatant des écarts inférieurs au pourcent entre les résultats de la simulation et la valeur théorique indiquée dans le tableau 4.1. Le graphe 4.6(a) indique l'évolution de l'écart entre les valeurs mesurées et la valeur calculée analytiquement en fonction du nombre de photons lancés ; on remarque que 10^7 photons sont nécessaires pour obtenir un écart inférieur à 10%, sans influence de la direction visée.

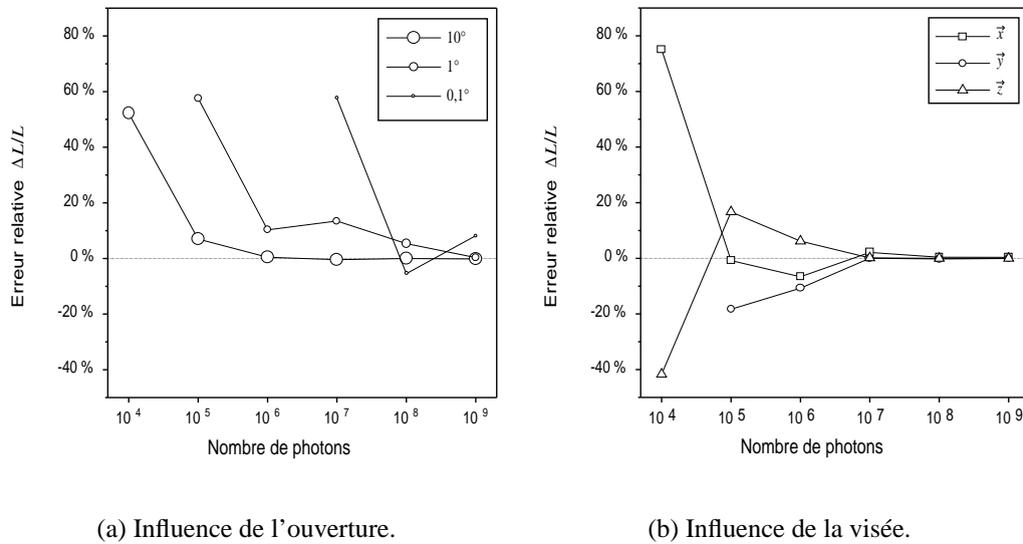


FIG. 4.6 – Résultats du test du code de tracé de photons semi-Monte-Carlo en réflexions multiples : l'écart relatif entre les valeurs de luminance obtenues par simulation et par calcul analytique est tracé en fonction du nombre de photons lancés, pour différentes ouvertures (a) et différentes visées (b) du luminancemètre.

Contrairement à la visée, l'ouverture du luminancemètre influe directement sur la vitesse de convergence. En effet, plus l'ouverture est importante, plus le nombre de contributions au détecteur est significatif. Pour quantifier cette tendance, on a simulé trois luminancemètres placés au centre de la sphère et visant la même direction ($\vec{x} + \vec{y} + \vec{z}$) avec des ouvertures respectives de 10°, 1° et 0,1°. Le graphe 4.6(b) indique l'évolution de l'écart relatif entre les valeurs obtenues par simulation et la valeur calculée analytiquement, en fonction du nombre de photons lancé. On vérifie que le nombre de photons nécessaire à l'obtention d'un résultat significatif augmente fortement à mesure que l'ouverture du luminancemètre diminue.

Les résultats précédents ont montré la validité du code de simulation pour une valeur particulière du facteur de réflexion ρ . Afin de généraliser cette validation, on a vérifié que les valeurs de luminance obtenues par simulation et par calcul analytique étaient bien les mêmes quelle que soit la valeur de ce paramètre. On a donc choisi quatre valeurs supplémentaires pour le facteur de réflexion, comprises entre 0,2 et 0,8. On a procédé à des simulations avec 10⁸ photons (nombre pour lequel on peut estimer que la simulation aura raisonnablement convergé, vu la figure 4.6(a)), et constaté des écarts relatifs de l'ordre de quelques pourcents dans les résultats par rapport aux valeurs attendues.

4.3.2.4 Conservation de l'énergie

Les comparaisons présentées entre des valeurs de luminance obtenues par simulation et par calcul analytique permettent de conclure que le code semi-Monte-Carlo de simulation de la propagation de la lumière respecte bien la condition de conservation de l'énergie.

4.3.3 Comparaison avec une technique purement Monte-Carlo

Faute d'un cas favorable permettant d'écrire l'expression analytique de la luminance en présence d'un milieu participant, on a procédé à des comparaisons avec des résultats obtenus à l'aide d'un code de simulation ayant déjà fait l'objet d'une validation. On a utilisé le logiciel MuScat⁴ développé par le Laboratoire Énergétique des Systèmes et Procédés de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen [BMGG92] et qualifié par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées pour les études de visibilité routière dans le brouillard [PCG⁺96, PC98]. On a simulé une expérimentation consistant à mesurer la luminance de cibles circulaires éclairées par un projecteur de véhicule à l'intérieur d'une enceinte en présence de brouillard.

4.3.3.1 Description de la scène

Les dimensions de l'enceinte sont celles des installations de production de brouillard artificiel du LRPC de Clermont-Ferrand, présentées dans le premier chapitre, dont les dimensions sont : 30 m en longueur, 5,5 m en largeur et 2,7 m en hauteur. On fait l'hypothèse que toutes les parois sont parfaitement absorbantes.

La source lumineuse est le projecteur gauche du véhicule dont la partie avant prolonge le poste d'observation (voir la figure 1.1 page 25). Le projecteur est situé à 0,62 m du sol, et allumé en position feu de croisement. Le solide photométrique de cette source a été mesuré en laboratoire.

Trois cibles de 0,6 m de diamètre sont placées en différentes positions, à une distance de 10 m devant le projecteur :

- la cible n°1 est alignée avec le projecteur ;
- la cible n°2 est décalée de 0,3 m vers le haut et de 2 m vers la droite par rapport à la cible n°1 ;
- la cible n°3 est décalée de 0,3 m vers le haut par rapport à la cible n°1.

Deux types de matériau sont utilisés pour simuler des cibles absorbantes (noires) ou lambertiennes avec un facteur de réflexion ρ de 0,93.

Trois détecteurs sont placés à la position du regard du conducteur, c'est-à-dire décalés de 1,6 m vers l'arrière et de 0,4 m vers la droite par rapport au projecteur. Chacun vise une des trois cibles avec une ouverture de 3°.

Une granulométrie typique des installations du LRPC de Clermont-Ferrand (présentée dans le premier chapitre) est utilisée pour calculer la fonction de phase du brouillard simulé. Le mode de distribution du diamètre des gouttelettes est légèrement inférieur au micron.

4.3.3.2 Comparaison des résultats

Les résultats des simulations, obtenus en lançant 10^8 photons pour différentes valeurs du coefficient d'extinction comprises entre 0 (pas de brouillard) et $0,25 \text{ m}^{-1}$ (soit environ 12 m de visibilité météorologique), sont présentés dans les graphes de la figure 4.7. Les images des cibles sont présentées en annexe B dans les tableaux des pages 161 et 162. On remarque notamment

4. *Multiple Scattering*

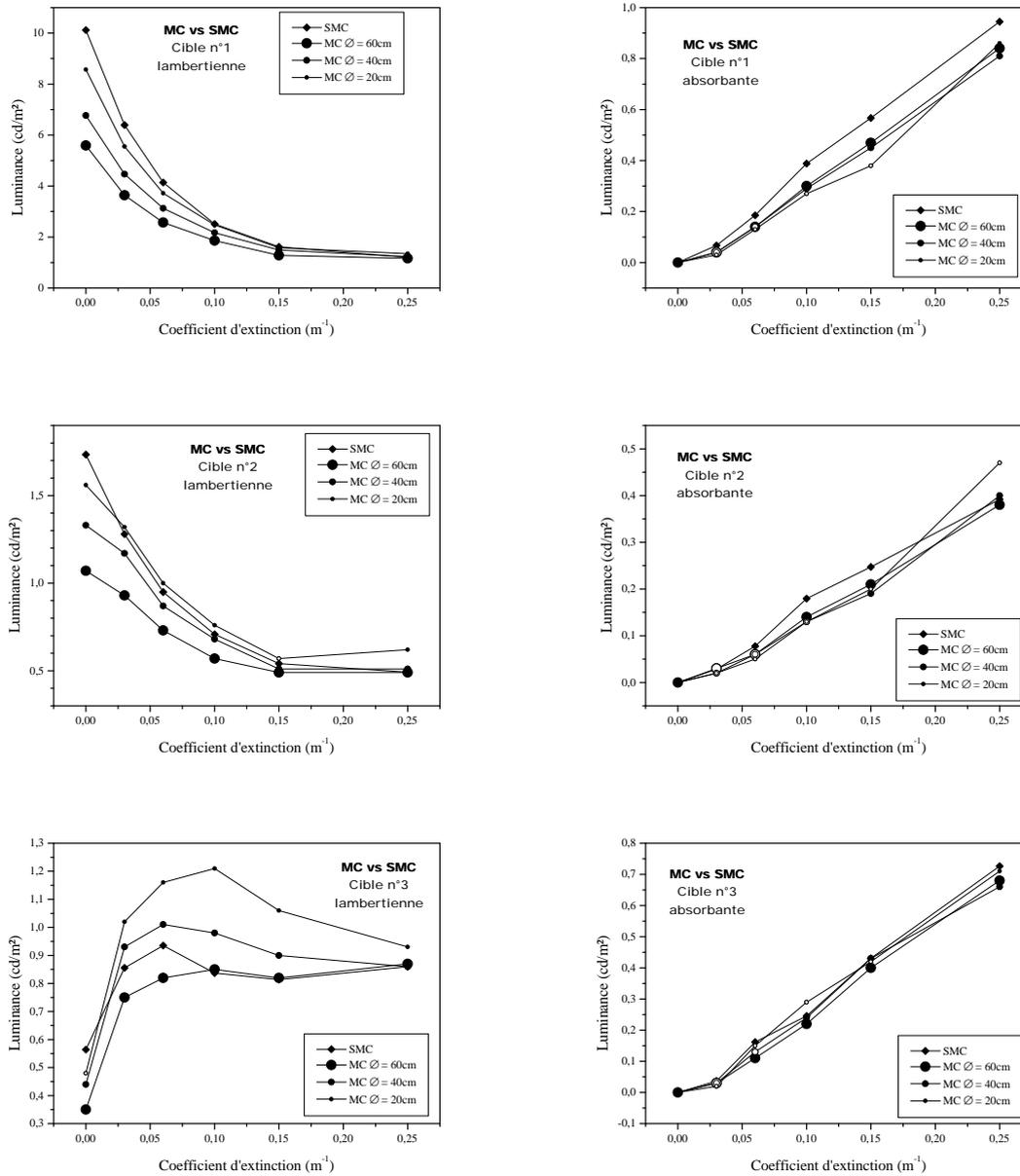


FIG. 4.7 – Comparaison entre les méthodes purement Monte-Carlo et semi-Monte-Carlo sur la luminance de cibles absorbantes et lambertiennes éclairées par un projecteur dans le brouillard. Les symboles ouverts indiquent des résultats jugés non-significatifs.

l'hétérogénéité de la distribution de luminance sur la surface de la cible n°1, qui est placée dans une zone de fort gradient lumineux.

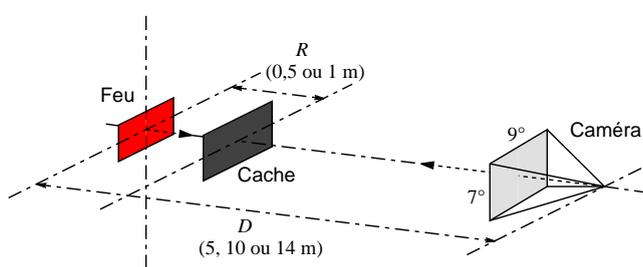
La figure 4.7 présente également les résultats obtenus à l'aide du code purement Monte-Carlo MusCat. Ce code utilise des détecteurs circulaires pour capter le flux des photons tracés dans la scène. La surface des détecteurs influe directement sur le nombre de photons comptabilisés, et donc sur la vitesse de convergence de la simulation : plus les capteurs sont petits, plus il faut lancer de photons pour obtenir des résultats significatifs.

On observe ainsi que les résultats obtenus par la méthode purement Monte-Carlo convergent globalement vers ceux obtenus par la méthode semi-Monte-Carlo quand la taille des détecteurs diminue. Cette comparaison permet donc de valider indirectement le code de tracé de photons semi-Monte-Carlo présenté.

4.3.4 Comparaison avec des mesures en brouillard artificiel

L'idée de comparer directement les résultats simulés précédents avec les mesures qui avaient été réalisées sur les cibles en brouillard artificiel a été abandonnée, car ces mesures avaient été jugées inexploitable (en raison de problèmes d'hétérogénéité du brouillard et de précision du positionnement des cibles par rapport au projecteur) et n'avaient déjà pas permis de mener à bien la comparaison prévue avec le code MusCat.

D'autres mesures ont été réalisées ultérieurement en brouillard artificiel, à l'aide d'une caméra numérique étalonnée en luminance [BH96]. L'objectif était de mesurer le halo de diffusion matérialisé par le brouillard autour d'un feu lumineux. La procédure, illustrée par le schéma de la figure 4.8, consistait à positionner la source à différentes distances de la caméra, en interposant une plaque sombre à 1 m de la surface lumineuse afin de réduire la dynamique de luminance en supprimant le rayonnement direct.



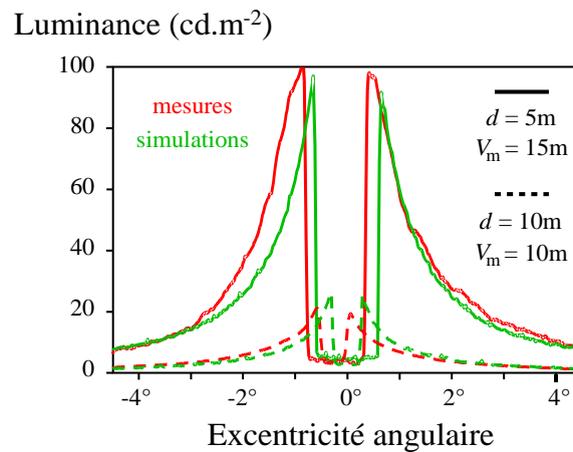
(a) Description géométrique.



(b) Exemple de carte d'isoluminance mesurée.

FIG. 4.8 – Principe de l'expérience réalisée dans les salles de brouillard du LRPC de Clermont-Ferrand afin de mesurer le profil de luminance du halo diffusé d'une source à l'aide d'une caméra numérique étalonnée.

Cette expérimentation a ensuite été modélisée et simulée à l'aide du code de tracé de photons semi-Monte-Carlo. La correspondance entre les résultats simulés et mesurés est relativement acceptable (voir l'exemple en figure 4.9(a)), étant donné l'impossibilité de reproduire exactement les conditions expérimentales, notamment en raison des hétérogénéités spatiales du brouillard artificiel constatées lors des mesures (visibles dans l'exemple présenté en figure 4.9(b)).



(a) Exemples de profils de luminance dans un halo diffusé.



(b) Mise en évidence de l'hétérogénéité du brouillard artificiel.

FIG. 4.9 – La comparaison entre les profils de luminance d'un halo diffusé obtenus par mesure et par simulation est rendue difficile par l'impossibilité de modéliser précisément les conditions expérimentales, notamment l'hétérogénéité du brouillard.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une mise en œuvre de la technique de tracé de photons est présentée. Le code de simulation qui en résulte, baptisé PROF⁵, permet de recueillir des données photométriques précises au sein d'un milieu diffusant tel que le brouillard, en simulant des mesures de luminance.

L'algorithme mis au point, basé sur le principe de Monte-Carlo, permet de prendre en compte les lois physiques qui gouvernent la propagation de la lumière, de façon souple et intuitive. Il permet notamment de prendre en compte les propriétés photométriques des sources, des matériaux et du milieu avec un minimum d'approximations. Il est néanmoins nécessaire de lancer un grand nombre de photons pour atteindre des résultats significatifs et réduire le niveau du bruit. L'usage de la technique d'estimation de l'évènement suivant permet toutefois de synthétiser des images, contrairement à ce qu'il est possible de réaliser avec une technique purement Monte-Carlo.

Le code de simulation ainsi développé va permettre de simuler l'impact du phénomène de diffusion sur l'image d'un objet distant, et d'étudier notamment l'influence de la microstructure du brouillard sur les perturbations du signal visuel.

5. Photometrical Rendering Of Fog

Chapitre 5

Caractérisation du brouillard par un opérateur fréquentiel de contraste

Les facteurs qui déterminent la visibilité d'un objet dans l'atmosphère sont nombreux : outre les propriétés photométriques et géométriques de l'objet (luminance, couleur, taille et forme), il est nécessaire de prendre en compte la nature du fond sur lequel il se détache (luminance, couleur, complexité), ainsi que les caractéristiques diffusantes des particules en suspension dans l'air. Ces dernières sont susceptibles d'influer de manière significative sur les images transmises à travers l'atmosphère, atténuant et perturbant la distribution de luminance perçue par un observateur ou mesurée par un système optique.

Le problème de l'imagerie à travers un milieu diffusant se pose concrètement dans de multiples domaines d'application : militaire, météorologique, sous-marine, etc. Il a donc fait l'objet de nombreuses études, généralement dans le but de corriger les perturbations subies par le signal transmis. Ce champ de recherche s'est orienté dès la fin des années 30 vers l'application aux systèmes optiques de la théorie des systèmes linéaires, qui avait été utilisée auparavant avec succès dans les domaines de l'électronique et des communications. Le milieu diffusant (fumées, nuages, eau de mer, etc.) a alors été considéré comme une composante supplémentaire des systèmes optiques étudiés, un filtre dont la réponse intrinsèque est caractérisée par la fonction de transfert.

Cette approche est particulièrement adaptée au problème de la vision dans le brouillard, puisque le système visuel fonctionne à la manière d'un analyseur fréquentiel. L'œil lui-même est d'ailleurs souvent considéré comme un filtre linéaire passe-bande, la fonction de sensibilité au contraste étant assimilée à une fonction de transfert de modulation. C'est donc tout naturellement que l'analyse de Fourier a été appliquée, vers la fin des années 60, pour étudier la fonction de transfert optique du brouillard, en vue de décrire le filtrage fréquentiel subi par les images transmises à travers ce milieu diffusant.

Après quelques rappels sur les systèmes optiques linéaires invariants et sur l'analyse de Fourier, ce chapitre présente l'approche qui a conduit au choix de la fonction de transfert de modulation pour caractériser les perturbations subies par l'image d'un signal lumineux lorsqu'il est transmis à travers le brouillard. Les propriétés de cette fonction caractéristique sont ensuite passées en revue, et interprétées sur le plan de la perception visuelle.

5.1 Définitions et propriétés des filtres linéaires

La théorie des systèmes linéaires invariants est un outil fondamental pour la formulation des problèmes de traitement du signal, car elle permet de prévoir la réponse d'un système au signal qui lui est appliqué en entrée. Longtemps réservée au domaine du signal à une dimension (quantité électrique évoluant au cours du temps), son usage s'est développé depuis une trentaine d'années pour le traitement d'images. Les notions rappelées ci-après sont extraites de l'ouvrage de Bracewell sur l'imagerie [Bra95], ainsi que du guide de Smith sur le traitement des signaux numériques [Smi97].

5.1.1 Définitions

5.1.1.1 Signal visuel

Un signal est une grandeur physique véhiculant de l'information, décrite par ses variations en fonction de certains paramètres. Dans le cas de la vision, un observateur perçoit la scène qui l'entoure grâce à la distribution spatiale bidimensionnelle de luminance L que l'environnement projette vers son œil. Chaque point de coordonnées angulaires (x, y) de l'image bidimensionnelle ainsi formée, et appelée image optique par Desvignes [Des97], correspond à une direction dans le champ visuel, comme l'illustre la figure 5.1. Les variations de la luminance en fonction de la direction, $L(x, y)$, constituent donc le signal visuel.

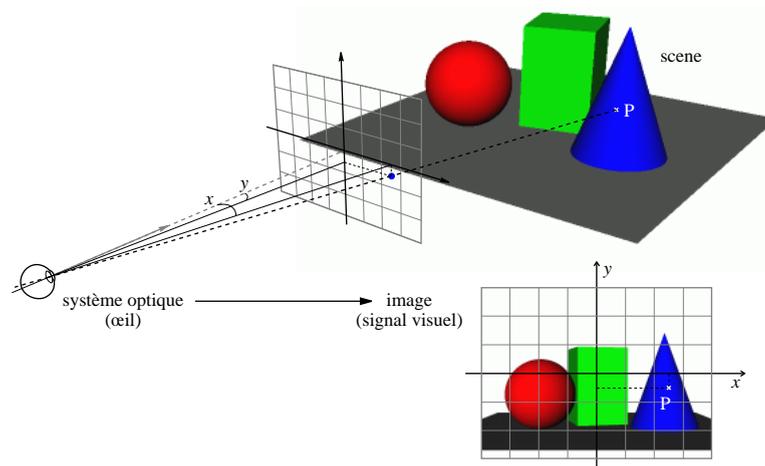


FIG. 5.1 – L'environnement se projette dans l'œil en une distribution bidimensionnelle de luminance pour y former une image optique qui constitue le signal visuel.

5.1.1.2 Système optique

Le terme système est ici utilisé pour désigner tout processus qui produit un signal de sortie en réponse à un signal d'entrée. Dans le domaine de l'imagerie, on s'intéresse aux systèmes

optiques, qui transforment une image initiale $L_e(x, y)$ en une image finale $L_s(x, y)$. La réponse d'un système est appelée fonction caractéristique.

5.1.1.3 Filtre linéaire

Un système \mathcal{S} est qualifié de linéaire lorsqu'il transforme toute combinaison linéaire de signaux élémentaires en une combinaison linéaire identique des transformées de chacun de ces signaux. La condition de linéarité se traduit de la manière suivante¹ :

$$\forall(L_1, L_2), \forall(\alpha_1, \alpha_2) \text{ et } \forall(x, y) \\ \mathcal{S}\{\alpha_1 L_1(x, y) + \alpha_2 L_2(x, y)\} = \alpha_1 \mathcal{S}\{L_1(x, y)\} + \alpha_2 \mathcal{S}\{L_2(x, y)\} \quad (5.1)$$

Un système linéaire est dit invariant lorsque tout déplacement dans le signal d'entrée induit un déplacement identique dans le signal de sortie. La condition d'invariance se traduit de la manière suivante :

$$\forall(x, y, x', y'), \quad \text{si } \mathcal{S}\{L_e(x, y)\} = L_s(x, y) \\ \text{alors } \mathcal{S}\{L_e(x + x', y + y')\} = L_s(x + x', y + y') \quad (5.2)$$

Un système à la fois linéaire et invariant, communément appelé filtre linéaire, a l'avantage d'être entièrement déterminé par sa réponse à un signal ponctuel unitaire, autrement dit une impulsion de Dirac $\delta(x, y)$:

$$\forall(x, y) \quad \delta(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{si } x = y = 0; \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (5.3)$$

C'est pourquoi leur fonction caractéristique est appelée réponse impulsionnelle, classiquement notée h :

$$\forall(x, y, x_0, y_0) \quad \mathcal{S}\{\delta(x - x_0, y - y_0)\} = h(x - x_0, y - y_0) \quad (5.4)$$

Cette propriété facilite grandement la caractérisation du système, ce qui explique l'importance de la théorie des systèmes linéaires invariants. Malheureusement, si la plupart des systèmes optiques sont linéaires, il est plus rare qu'ils soient réellement invariants : ainsi par exemple, un appareil photographique fournit souvent des images plus nettes au centre qu'en périphérie.

5.1.1.4 Analyse de Fourier

Une conséquence de la linéarité et de l'invariance est qu'un système doté de ces deux propriétés transforme tout signal sinusoïdal en un signal sinusoïdal de fréquence identique (l'amplitude et la phase peuvent varier). C'est ce corollaire qui permet d'introduire l'analyse de Fourier, sur laquelle est fondée la théorie des systèmes linéaires.

1. En traitement du signal, on parle du principe de superposition.

Cas monodimensionnel

La transformée de Fourier décompose une fonction² en une superposition de sinusôides de différentes fréquences, en identifiant leurs amplitudes respectives : elle donne ainsi accès au spectre de fréquences de la fonction. Mathématiquement, la transformée de Fourier est définie de la manière suivante :

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2i\pi ux} dx \quad (5.5)$$

$F(u)$ est une représentation de la fonction $f(x)$ dans le domaine fréquentiel, et donc u représente la fréquence en nombre de cycles par unité de x . La transformée de Fourier d'une fonction scalaire est à valeurs complexes : pour chaque fréquence, elle fournit non seulement l'amplitude, mais également la phase du signal considéré. L'amplitude de la composante de fréquence nulle

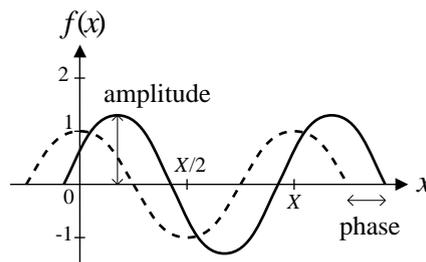


FIG. 5.2 – L'analyse de Fourier conduit à l'amplitude et à la phase des composantes fréquentielles d'un signal.

(appelée composante continue) correspond à la moyenne de la fonction. Si la fonction considérée est périodique, son spectre de fréquences est discret : outre la composante continue, il contient une fondamentale et des harmoniques ; si par contre la fonction n'est pas périodique, son spectre est continu. Quelques exemples sont donnés dans la figure 5.3 pour illustrer l'analyse de Fourier.

Cas bidimensionnel

Le cas monodimensionnel précédent peut être directement généralisé au cas des signaux bidimensionnels pour être appliqué aux systèmes optiques. La transformée de Fourier F d'une fonction f est alors définie de la manière suivante :

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-2i\pi(ux+vy)} dx dy \quad (5.6)$$

La transformation est inversible. Il est donc possible de reconstituer un signal $f(x, y)$ à partir de son spectre de Fourier $F(u, v)$:

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{2i\pi(ux+vy)} du dv \quad (5.7)$$

2. Il est nécessaire que la fonction soit absolument intégrable et dotée d'un nombre fini de discontinuités finies, ce qui est généralement le cas pour les signaux physiques.

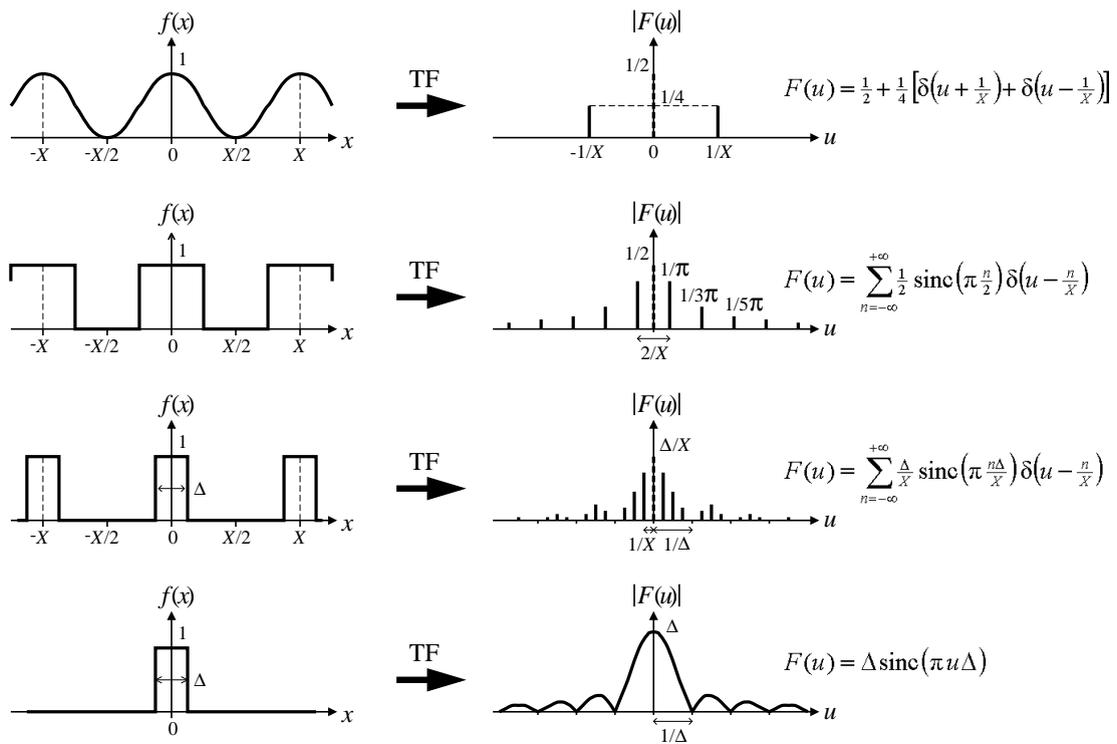


FIG. 5.3 – Exemples de fonctions avec leurs transformées de Fourier.

5.1.1.5 Convolution

Lorsqu'un signal est filtré par un système linéaire et invariant, l'amplitude et la phase de chacune de ses composantes fréquentielles sont modifiées. Cette opération, appelée produit de convolution, est définie mathématiquement de la manière suivante :

$$\begin{aligned} s(x, y) &= e(x, y) * h(x, y) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e(x - a, y - b) h(x, y) da db \end{aligned} \quad (5.8)$$

où e est le signal en entrée et s le signal en sortie du filtre linéaire de réponse impulsionnelle h .

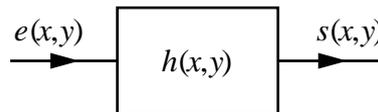


FIG. 5.4 – Représentation symbolique d'un système linéaire et invariant : une « boîte noire » de réponse impulsionnelle h qui transforme le signal d'entrée e en un signal de sortie $s = e * h$.

On montre que dans le domaine fréquentiel, la convolution devient un produit classique (et à l'inverse, le produit de deux fonctions correspond à la convolution de leurs spectres) :

$$S(u, v) = E(u, v)H(u, v) \quad (5.9)$$

où $E(u, v)$ et $S(u, v)$ sont les transformées de Fourier des signaux en entrée et en sortie, et $H(u, v)$ est la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle du filtre linéaire, appelée fonction de transfert. Dans le domaine de l'imagerie, il est courant de normaliser la fonction de transfert optique (FTO) par rapport à la composante continue $H(0, 0)$.

Comme on l'a déjà remarqué précédemment, la transformée de Fourier d'une fonction est à valeurs complexes. Ainsi, la fonction de transfert optique est dotée d'un module et d'une phase :

$$H(u, v) = |H(u, v)| e^{i \arg(H(u, v))} \quad (5.10)$$

Le module de la FTO est appelé fonction de transfert de modulation (FTM). Cette fonction décrit les variations d'amplitude engendrées par le système optique dans le spectre du signal filtré. La phase de la FTO, quant-à elle, contient l'information de localisation indispensable à la transition du domaine fréquentiel au domaine spatial. Dans le cas où la réponse impulsionnelle du filtre est caractérisée par une symétrie circulaire (fonction réelle et paire), sa phase est nulle : le filtre est alors entièrement caractérisé par sa FTM.

5.1.2 Propriétés

5.1.2.1 Combinaison de filtres linéaires

Un système optique peut en général être décomposé en un certain nombre n d'éléments individuels, chacun constituant un filtre linéaire doté de sa propre réponse impulsionnelle h_i . La

réponse impulsionnelle h du système dans son ensemble est alors le résultat de la convolution des réponses impulsionnelles individuelles :

$$h = h_1 * \dots * h_i * \dots * h_n \quad (5.11)$$

Il s'en suit que dans le domaine fréquentiel, la fonction de transfert H du système est le produit des n fonctions de transfert individuelles H_i :

$$H = \prod_{i=1}^n H_i \quad (5.12)$$

Cette propriété simple est fondamentale dans le domaine de l'imagerie, car elle permet de caractériser individuellement les différents éléments d'un système optique. Ainsi, lorsqu'on intercale un élément dans une chaîne de filtres déjà caractérisée dans son ensemble par sa fonction de transfert optique H , il suffit de déterminer la nouvelle fonction de transfert globale H' résultant de la modification pour avoir accès à la fonction de transfert H_i du filtre linéaire ajouté :

$$H_i = \frac{H'}{H} \quad (5.13)$$

5.1.2.2 Échantillonnage

D'après le théorème d'échantillonnage [Lac83], tout signal continu doté d'un spectre borné ($F(u) = 0$ si $|u| \geq u_{\max}$) peut être reconstruit sans erreur à partir du signal échantillonné à une fréquence u_e vérifiant :

$$u_e \geq 2u_{\max} \quad (5.14)$$

Pour s'assurer que cette condition (dite de Shannon, ou de Nyquist) est vérifiée, il est courant de faire précéder l'échantillonnage par un filtrage « passe-bas », qui élimine les hautes fréquences du signal continu. En effet, l'échantillonnage produit une périodisation dans le domaine de Fourier : les fréquences extérieures à la bande $]-u_e/2, u_e/2[$ y sont ramenées par un phénomène appelé repliement spectral (*aliasing* en anglais), ce qui rend impossible la reconstruction du signal initial. Ce phénomène est illustré dans les figures 5.5 et 5.6.

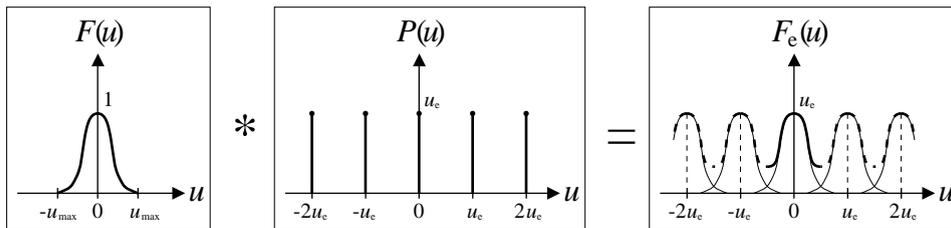


FIG. 5.5 – Une fréquence d'échantillonnage inférieure au double de la fréquence maximale provoque un repliement de spectre qui rend impossible la reconstruction sans erreur du signal échantillonné.

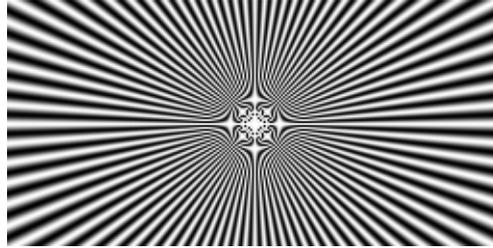


FIG. 5.6 – Le repliement de spectre est à l’origine des effets de moiré.

Une façon courante d’échantillonner le signal visuel $L(x, y)$ consiste à estimer la luminance moyenne dans chaque case d’une grille orthogonale, régulière et carrée, constituée de N^2 éléments, couvrant une fenêtre de taille angulaire α dans le champ de vision. On obtient ainsi un signal discret L_{ij} , pour une fréquence d’échantillonnage $u_e = \frac{N}{\alpha}$ dans les directions verticale et horizontale. Pour analyser le spectre discret S_{mn} de ce signal, on utilise les expressions discrètes de la transformation de Fourier et de son inverse [Bra95] :

$$S_{mn} = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} L_{ij} e^{-2i\pi \frac{mi+nj}{N}} \quad (5.15a)$$

$$L_{ij} = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} S_{mn} e^{2i\pi \frac{mi+nj}{N}} \quad (5.15b)$$

Les indices spatiaux i et j varient de 0 à $N-1$, et chaque incrément correspond à un déplacement de $\frac{\alpha}{N}$ degrés dans l’image. Les indices fréquentiels m et n varient également de 0 à $N-1$, et chaque incrément correspond à un décalage de $\frac{1}{\alpha}$ cycles par degré dans le spectre. Ainsi, selon l’ouverture angulaire α et la définition³ N de la fenêtre considérée, la bande spectrale étudiée (outre la composante continue) est comprise dans l’intervalle :

$$\frac{1}{\alpha} \leq |u| \leq \frac{N}{2\alpha} \quad (5.16)$$

La bande de fréquences spatiales discernables par le système visuel humain est limitée à environ 30 cycles par degré ($u_c = 30$ cpd). Il est donc souhaitable, dans un soucis d’optimisation, de choisir les paramètres N et α de manière à ce que la fréquence maximale étudiée soit proche de cette fréquence de coupure. Par ailleurs, l’algorithme le plus efficace pour calculer la transformation de Fourier discrète d’une image est la FFT⁴ bidimensionnelle, plus particulièrement lorsque la définition de l’image numérique est égale à une puissance de 2 [PTVF92].

3. La définition d’une image correspond au nombre de pixels, alors que la résolution correspond à la taille angulaire de ces pixels.

4. De l’anglais *Fast Fourier Transform*.

5.2 Filtrage fréquentiel du contraste par le brouillard

5.2.1 Théorie de la FTM atmosphérique

Pour répondre aux besoins de l'observation de la Terre par satellite⁵ et des astres par télescope, l'analyse de Fourier a rencontré un grand succès dans le traitement des problèmes de vision à travers l'atmosphère. Si on considère la scène observée comme une distribution de sources lumineuses ponctuelles, l'image transmise L peut être obtenue en superposant les images de ces sources prises individuellement, ce qui revient à convoluer l'image non perturbée L_0 de la scène (celle qu'on pourrait obtenir dans une atmosphère idéalement stable et transparente) par la réponse impulsionnelle h_{atm} de la couche d'atmosphère traversée. L'atmosphère et le capteur utilisé pour recueillir le signal forment alors un système dont on peut caractériser les performances par l'intermédiaire de sa fonction de transfert optique, ou plus simplement par sa fonction de transfert de modulation (FTM) dans le cas des rayonnements incohérents. La FTM de ce système est le produit de la FTM de chacun de ses éléments d'après 5.12. La connaissance de cette fonction caractéristique a deux intérêts majeurs : elle permet de prédire le niveau de contraste nécessaire à la détection de certains détails [PV80, SKR95], et elle permet de réhausser le contraste en éliminant certaines perturbations par déconvolution [YDK97]. À mesure que les progrès technologiques ont permis d'améliorer les performances des capteurs, les efforts se sont portés sur la caractérisation des effets de l'atmosphère, et cette approche a donné naissance à la théorie de la FTM atmosphérique [Lut78].

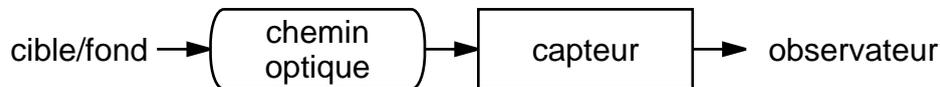


FIG. 5.7 – Représentation schématique d'un système électro-optique d'imagerie (d'après [PV80]).

Plusieurs phénomènes sont à l'origine de la distortion des images transmises à travers l'atmosphère. On distingue principalement trois effets indépendants : l'interaction (absorption et diffusion) de la lumière avec les molécules d'air, l'interaction de la lumière avec les aérosols et la réfraction due aux turbulences. Chacun de ces phénomènes peut être caractérisé par sa propre FTM, et la FTM atmosphérique M_{atm} résulte de leur combinaison :

$$M_{\text{atm}} = M_m M_a M_t \quad (5.17)$$

où M_m est la FTM liée aux molécules d'air, M_a est la FTM liée aux aérosols et M_t est la FTM liée aux turbulences. Les effets liés aux turbulences et aux molécules d'air n'interviennent que pour des distances d'observation de plusieurs kilomètres [Bis94, YDK97, Bel98]. Dans la situation qui nous intéresse, en présence d'un brouillard assez dense pour réduire la visibilité météorologique à quelques centaines de mètres, ces effets sont négligeables [DK81]. La FTM

5. *Remote sensing* en anglais.

atmosphérique est alors égale à la FTM du brouillard, qui dépend des propriétés optiques des particules en suspension dans l'air.

5.2.2 La FTM du brouillard

La méthode la plus répandue pour évaluer la FTM d'un milieu diffusant est l'approximation des petits angles (SAA⁶). Initialement développée à l'usage des problèmes d'hydro-optique [Wel69], elle permet d'exprimer analytiquement la FTM d'un milieu homogène et isotrope formé de particules sphériques distribuées aléatoirement et de taille suffisamment importante par rapport à la longueur d'onde pour générer une diffusion avant prépondérante. En considérant une onde sphérique subissant de multiples diffusions dans des directions faisant un angle faible par rapport à la direction incidente, on obtient l'expression suivante, rapportée sous diverses formes par de multiples auteurs [Lut78, DK81, BDIZ93, ZK94] :

$$M(\nu, z) = e^{-(1-a)Kz - aKz(1-f(\nu z))} \quad (5.18)$$

avec

$$f(x) = 2\pi \int_0^1 \int_0^\pi P(\theta) J_0(xu \sin \theta) \sin \theta d\theta du \quad (5.19)$$

où ν est la fréquence spatiale en cycles par degré, z est la distance de transmission, K et a sont le coefficient d'extinction et l'albédo du milieu, $P(\theta)$ est la fonction de phase du milieu, et J_0 est la fonction de Bessel d'ordre 0 [PTVF92]. Le graphe de la figure 5.8 présente les FTM obtenues par cette approximation lorsqu'elle est appliquée à trois brouillards de granulométries différentes. Certains auteurs introduisent une approximation supplémentaire en considérant une fonction de phase gaussienne ou une densité optique très supérieure à 1, ce qui leur permet de proposer une expression plus simple de la FTM [Lut78, KI85].

Sur la base de cette approximation, il est possible de prédire que la FTM du brouillard est une fonction décroissante de la longueur d'onde qui tend vers une valeur constante et égale à la transmissivité au-delà d'une fréquence de coupure dont la valeur est croissante avec la taille des gouttelettes [SK94].

Mais l'utilisation de l'approximation des petits angles repose sur des hypothèses fortes qui, si elles sont acceptables pour des cas comme l'observation à travers les nuages, semble conduire à des écarts entre théorie et expérience pour les cas où la taille des particules du milieu ne peut pas être considérée comme très supérieure à la longueur d'onde, comme c'est le cas pour le brouillard [VDS85, KI85]. L'usage de plus en plus répandu de la méthode de Monte Carlo pour simuler la propagation de la lumière dans un milieu polydispersé a permis d'étudier plus finement la FTM, et de mettre en évidence la complexité des effets fréquentiels de la diffusion sur la transmission du contraste [BBD⁺95]. Toutefois, la majorité des travaux visant à évaluer la FTM atmosphérique par simulation s'intéresse à l'imagerie longue-distance. Il ne semble pas que le brouillard routier, avec des distances d'observation de l'ordre de la centaine de mètres et un large champ de vision, ait fait l'objet d'une telle étude à ce jour. C'est avec cet objectif que le code de simulation présenté dans le chapitre 4 a été développé et mis en œuvre.

6. *Small angle approximation* en anglais.

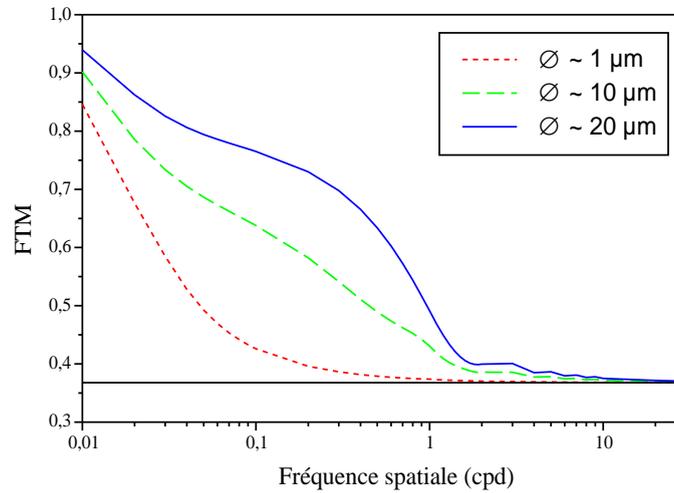


FIG. 5.8 – FTM théorique calculée à l'aide de l'expression analytique 5.18 issue de l'application de l'approximation des petits angles, pour des milieux homogènes formés de gouttelettes d'eau sphériques de différents diamètres.

5.3 Étude des propriétés de la FTM du brouillard par simulation

5.3.1 Recueil des données par simulation

5.3.1.1 Mode de calcul de la FTM

La fonction de transfert d'un filtre linéaire peut être déterminée de diverses manières. En mettant en œuvre l'analyse de Fourier, le calcul de la FTM M est théoriquement possible à partir de n'importe quel signal : il suffit de recueillir une image non filtrée L_0 , puis une image filtrée L , et de faire le rapport des modules de leurs transformées de Fourier⁷ :

$$M = \frac{|\mathcal{F}\{L\}|}{|\mathcal{F}\{L_0\}|} \quad (5.20)$$

D'après la propriété des combinaisons de filtres linéaires (équation 5.12), la fonction de transfert du système d'acquisition s'élimine dans le rapport, ce qui permet d'accéder à la réponse intrinsèque du filtre étudié, en l'occurrence le brouillard. Il faut toutefois porter une attention particulière à la bande passante et à la dynamique du système d'acquisition, qui sont susceptibles de limiter la validité des résultats obtenus [SK93, DSK98]. De plus, la FTM d'un volume de milieu diffusant comme le brouillard dépend de l'épaisseur de la couche considérée ; il faut donc veiller à utiliser un signal bidimensionnel, entièrement compris à une distance donnée du capteur électro-optique.

7. \mathcal{F} désigne la transformation de Fourier.

En pratique, il faut également veiller à ce que le spectre du signal contienne une énergie suffisante sur toute la bande de fréquences spatiales étudiées, faute de quoi l'équation 5.20 donne lieu à une indétermination susceptible d'introduire des erreurs importantes (division par zéro). Le choix du type de signal à utiliser reste malgré tout relativement large, et dépend du contexte. Le signal le plus favorable à la détermination de la FTM est une source lumineuse ponctuelle, car son spectre est uniforme : la transformée de Fourier d'un dirac est une constante. Mais la disponibilité ou la réalisation expérimentale d'un tel signal peut être problématique [Fou00]. Une solution alternative, qui permet dans le même temps d'éviter l'analyse de Fourier, consiste à échantillonner la FTM en mesurant directement le facteur de transmission du contraste à l'aide de mires sinusoïdales de différentes fréquences spatiales ; mais l'obtention de telles mires s'avère au moins aussi malaisée que celle d'une source lumineuse ponctuelle. Il est possible de se contenter de mires carrées, plus faciles à réaliser [Nam92, Zou94], voire à trouver dans la nature [YDK97] ; mais du fait de la présence d'harmoniques dans le signal, un post-traitement complexe est alors nécessaire pour accéder à la FTM [BY95, Luc98].

L'utilisation de la simulation permet de s'affranchir d'une grande part des problèmes qui se posent lorsqu'on cherche à calculer la FTM d'un milieu diffusant. Dans le cas où l'on dispose d'une technique de synthèse d'images qui permet de tenir compte de la nature diffusante du milieu au sein duquel se propage la lumière, il est facile de générer un signal ponctuel. De plus, il est possible de mettre en œuvre un système d'acquisition idéal, doté d'une dynamique uniquement limitée par la précision des calculs. Si on ajoute à cela la maîtrise des paramètres étudiés, notamment les propriétés microphysiques et l'homogénéité du milieu, il est aisé de comprendre l'engouement pour cette approche : la plupart des travaux cités dans ce chapitre font appel à la simulation. L'usage de l'expérimentation est généralement réservé à des mesures réalisées en laboratoire (souvent à échelle réduite) en vue d'étayer certaines approximations utilisées pour la simulation. Les mesures *in situ*, beaucoup plus rares, sont plutôt destinées à établir la faisabilité de techniques d'extraction d'information dans les images perturbées par la transmission.

On a donc choisi de simuler la transmission d'un signal lumineux ponctuel à travers différentes couches de brouillard, afin d'étudier les propriétés de la FTM en analysant ses variations en fonction des paramètres susceptibles d'être influents : la granulométrie, la concentration et l'épaisseur du brouillard, l'ouverture angulaire de la source et celle du détecteur.

5.3.1.2 Adaptation du code de simulation PROF pour le recueil de la réponse impulsionnelle du brouillard

Contrairement à la plupart des codes de simulation développés spécifiquement pour étudier la FTM d'un milieu diffusant [Wal92, BDIZ93], le programme PROF, décrit dans le chapitre 4, a été développé dans le but de simuler des mesures photométriques dans une géométrie quelconque, éclairée par des sources quelconques, et plongée dans un milieu diffusant. Il n'est donc pas spécifiquement optimisé pour déterminer la réponse impulsionnelle de ce milieu. Mais grâce à la souplesse de la méthode de Monte-Carlo, il est relativement simple d'adapter le code en vue de l'étude spécifique de la FTM du brouillard. Un capteur dédié a donc été ajouté, destiné à recueillir la réponse impulsionnelle du brouillard.

Capteur monodimensionnel

En premier lieu, il est raisonnable de considérer que la réponse impulsionnelle bidimensionnelle (2D) d'une tranche de brouillard est symétrique autour de son axe, en faisant l'hypothèse que le milieu est isotrope et homogène. L'isotropie est justifiée par la sphéricité des gouttelettes d'eau qui forment le brouillard ; l'homogénéité est moins évidente, mais reste justifiable en situation de brouillard routier dense (visibilité météorologique inférieure à 200 m). Il est alors possible de se ramener à une information monodimensionnelle (1D).

Pour ce faire, une solution simple consiste à calculer l'image d'un point lumineux transmise par le brouillard à l'aide d'une « caméra » 2D normale, puis à pratiquer un moyennage circulaire afin d'agréger l'information des pixels localisés à des excentricités équivalentes. D'après Stemprok *et al.* [SGT00], qui utilise la transformée de Fourier de l'image d'une scène routière pour quantifier la « visibilité », l'aliassage introduit par le moyennage circulaire devient négligeable lorsque la définition dépasse quelques centaines de pixels par ligne et colonne. Une manière de réduire ce problème tout en évitant la haute définition (car plus l'ouverture angulaire des pixels est faible, plus le bruit est important) consiste à définir des classes d'excentricité, dont la largeur influe de manière contradictoire sur la réduction du bruit et sur celle du biais. Quoi qu'il en soit, cette technique ne permet d'exploiter qu'une partie seulement de l'image, comme le montre la figure 5.9.

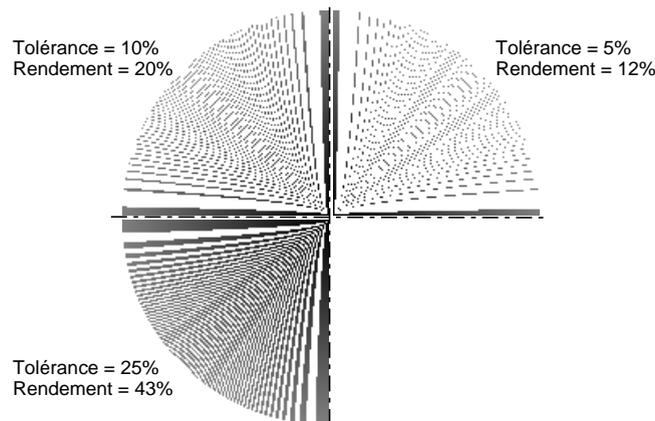


FIG. 5.9 – Masques de moyennage circulaire de la réponse impulsionnelle (pour une définition de 256×256) : chaque niveau de gris, de 0 à 127, correspond à une classe d'excentricité. La tolérance indique la largeur de classe, et le rendement indique la proportion de pixels pris en compte.

Il est donc plus efficace de trier l'énergie captée au niveau du récepteur en fonction des coordonnées de chaque contribution dans le plan image. On favorise ainsi la précision en réduisant les classes d'excentricité à leur largeur minimale. Le volume d'information stocké en mémoire est également réduit, puisque l'énergie captée au niveau de différents pixels situés à la même excentricité est intégrée. Le pixel central, d'excentricité nulle, est unique ; mais les pixels sur les médianes et les diagonales de l'image sont représentés 4 fois ; les autres pixels sont représentés 8 fois. Il est ainsi possible d'atteindre un taux de compression proche de 8 : une image de

$(2^n + 1) \times (2^n + 1)$ pixels est réduite à un tableau de N_{1D} valeurs :

$$N_{1D} = (2^{n-1} + 1)(2^{n-2} + 1) \quad (5.21)$$

Le mode d'indexation des pixels dans ce capteur 1D est indiqué dans la figure 5.10 : lorsqu'un « photon » croise le plan image aux coordonnées d'index (l, c) par rapport au centre, il contribue à l'excentricité d'index e donné par l'équation 5.22 :

$$e = \sum_{k=0}^{|l|} k + |c| = \frac{|l|(|l| + 1)}{2} + |c| \quad (5.22)$$

Les résultats doivent être pondérés par le nombre d'occurrences de chaque excentricité dans l'image. Il est ensuite aisé de reconstituer temporairement le signal 2D au moment d'effectuer l'analyse de Fourier.

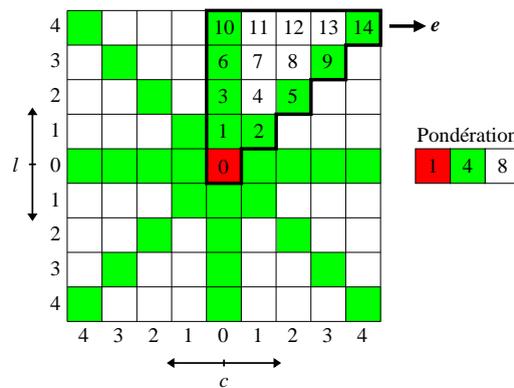


FIG. 5.10 – Illustration du mode d'indexation du capteur 1D, qui permet d'exploiter la symétrie centrale de la réponse impulsionnelle 2D.

Décomposition angulaire

Pour étudier l'influence de l'ouverture de la source ponctuelle sur la réponse impulsionnelle d'une couche de brouillard, la solution simple consiste à lancer autant de simulation qu'il y a de valeurs d'ouverture à tester. Mais en vue de limiter le nombre de simulations à effectuer, il est préférable d'exploiter la redondance d'informations qu'entraînerait cette méthode. Pour ce faire, le signal transmis à travers la couche de brouillard étudiée est décomposé en fonction de l'angle d'émission par la source, prise isotrope. En pratique, la technique consiste à découper l'angle solide d'émission Ω de demi-ouverture β en portions contigues $\Delta\Omega_i$ délimitées par des demi-angles d'ouverture β_{i-1} et β_i . Le principe de cette décomposition est illustré en figure 5.11. À chaque portion de lobe d'émission $\Delta\Omega_i$ est associée une portion $\Delta\Phi_i$ du flux total Φ émis par la source :

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_i &= \frac{\Delta\Omega_i}{\Omega} \Phi \\ &= \frac{\cos \beta_{i-1} - \cos \beta_i}{1 - \cos \beta} \Phi \end{aligned} \quad (5.23)$$

ce qui induit l'expression suivante pour le flux Φ_i émis dans le lobe $\Omega_i = \sum_{k=1}^i \Delta\Omega_k$:

$$\begin{aligned}\Phi_i &= \frac{\Omega_i}{\Omega} \Phi \\ &= \frac{1 - \cos \beta_i}{1 - \cos \beta} \Phi\end{aligned}\quad (5.24)$$

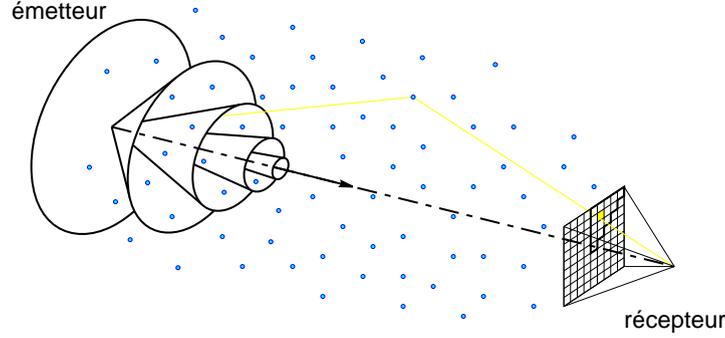


FIG. 5.11 – Décomposition de la réponse impulsionnelle en fonction de l'angle d'émission par la source isotrope.

En ajoutant au capteur une dimension supplémentaire, il est possible de répartir l'énergie lumineuse recueillie en fonction de l'angle d'émission des photons : la part ΔL_0 correspond aux contributions directes, alors que les parts $\Delta L_{i>0}$ correspondent aux contributions diffuses venant des photons émis dans les portions de lobe $\Delta\Omega_i$. Pour reconstituer le signal L_i correspondant à une source de demi-ouverture β_i donnée, un calcul simple est nécessaire, consistant à combiner les énergies reçues issues des portions de lobe composant l'angle solide d'émission considéré, et à pondérer le résultat par la part du flux total de la source émise dans ce lobe, selon l'équation 5.25 :

$$\begin{aligned}\forall e \in [0, N_{1D}] \quad L_i(e) &= \frac{\Phi}{\Phi_i} \sum_{k=0}^i \Delta L_k(e) \\ &= \frac{1 - \cos \beta}{1 - \cos \beta_i} \sum_{k=0}^i \Delta L_k(e)\end{aligned}\quad (5.25)$$

où e est l'excentricité de réception définie par l'équation 5.22. Il est à noter que $\Delta L_0(e > 0) = 0$, et que $\Delta L_{i>0}(\forall e) = 0$ sans brouillard.

5.3.1.3 Géométrie de l'étude

Outre les caractéristiques intrinsèques du brouillard (granulométrie et concentration), les paramètres susceptibles d'influer sur la FTM lorsqu'elle est calculée à partir de la réponse impulsionnelle sont la distance de transmission entre la source ponctuelle et le capteur, qui délimite

une tranche de brouillard d'une certaine épaisseur, ainsi que les ouvertures angulaires respectives de l'émetteur et du récepteur. Croiser ces cinq paramètres nécessite de nombreuses simulations, et étant donné les temps de calcul nécessaires à l'obtention de résultats significatifs par l'approche de Monte Carlo, il est souhaitable d'optimiser l'exploitation de chaque simulation afin d'en extraire un maximum d'informations.

Ainsi, puisque le code de simulation PROF autorise l'utilisation simultanée de plusieurs capteurs, une seule simulation est nécessaire pour étudier l'influence de la distance de transmission, de l'ouverture angulaire de réception et de l'ouverture angulaire d'émission (en utilisant le capteur spécifique décrit précédemment) pour un brouillard de granulométrie et de concentration données.

La géométrie utilisée pour l'étude est décrite dans la figure 5.12. Il s'agit d'une salle de brouillard « virtuelle » de forme parallélépipédique, aux parois absorbantes, contenant un volume homogène de brouillard de 250 m en longueur et de 100 m en largeur et hauteur. Les dimensions ont été fixées de manière à pouvoir étudier des brouillards denses, avec des concentrations induisant des visibilités météorologiques inférieures à 150 m, tout en limitant les effets de bord. À l'une des extrémités de ce volume, à 50 m des limites, est placée une source ponctuelle isotrope émettant un flux unitaire dans un angle solide de 2π sr (demi-espace) pointé vers l'autre extrémité du volume. Le long de l'axe principal sont disposés les capteurs, pointés vers la source.

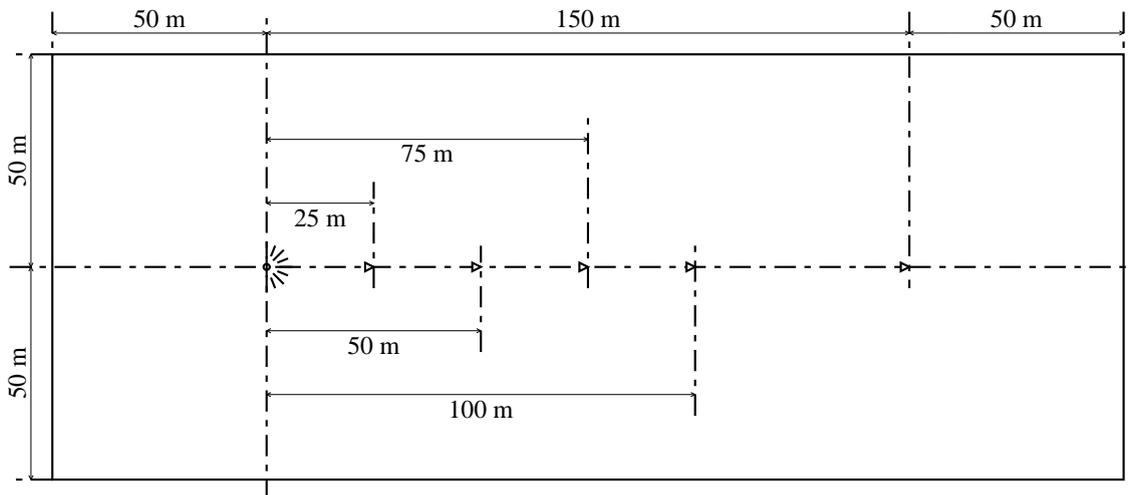


FIG. 5.12 – Géométrie utilisée pour recueillir la réponse impulsionnelle d'un brouillard de granulométrie et de concentration données en fonction des ouvertures angulaires d'émission et de réception, et de la distance de transmission.

Cent millions de photons ont été lancés pour les cas de visibilité supérieure ou égale à 50 m, et un milliard pour les cas de densité plus importante. Pour chaque simulation, on a lancé dix fois un dixième des photons afin de pouvoir obtenir une estimation de la convergence en calculant l'écart-type des résultats [Jaf95]

5.3.2 Influence des paramètres liés au milieu

Dans un premier temps, l'ouverture des capteurs a été fixée à $\alpha = 4^\circ$ et leur définition 2D à $2^n + 1$ avec $n = 8$, ce qui permet d'étudier la transmission du contraste pour des fréquences spatiales comprises entre 0, 25 et 32 cpd (d'après l'équation 5.16).

5.3.2.1 Influence de la microstructure

La question de l'influence de la taille des gouttelettes sur la transmission du contraste en fonction des fréquences spatiales est souvent abordée dans les travaux portant sur les effets visuels du brouillard, et donne lieu à des avis partagés. Desvignes [Des97], par exemple, considère que la transmission à travers un milieu diffusant donne lieu à une perte de contraste qui dépend peu de la fréquence spatiale dans le domaine concernant la qualité des images. Il reprend en cela les résultats de l'analyse théorique de Bissonnette [Bis94], basée sur la théorie des petits angles (SAA), qui conclut que l'effet des aérosols sur la FTM atmosphérique est négligeable. Pourtant, d'autres tels que Drofa *et al.* [DK81] ou Sadot *et al.* [SK93], se basant sur la même théorie, prédisent des variations importantes de la forme de la FTM en fonction de la microstructure du milieu diffusant. On retrouve la même divergence dans les conclusions des rares études expérimentales, toutes réalisées en brouillard artificiel. La fonction de transfert de contraste (FTC) observée par Zouboff [Zou94] ne montre pas de variation dans la gamme de fréquences visibles, de même que la FTM mesurée par la société Sira Ltd [AW97]. Pourtant, des mesures antérieures mais similaires, réalisées par Volnistova *et al.* [VDS85] et par Nameda [Nam92], tendent à montrer que le brouillard transmet préférentiellement le contraste dans les basses fréquences spatiales, et ce d'autant plus que la taille des gouttelettes est importante.

Pour tenter de clarifier ces divergences apparentes, on a calculé par simulation la FTM de trois brouillards de microstructures différentes, pour une distance d'observation de 17 m correspondant à la base de mesure du montage expérimental décrit par Nameda [Nam92] et reproduit par Zouboff [Zou94]. En effet, la principale différence entre ces deux études tient à la nature du brouillard artificiel utilisé. La granulométrie du brouillard de Nameda, généré dans une enceinte de $25 \times 30 \times 35 \text{ m}^3$ en soufflant de la vapeur d'eau chaude, présente un mode à environ $20 \mu\text{m}$ de diamètre ; la granulométrie du brouillard de Zouboff, généré dans une enceinte de $30 \times 5,5 \times 2,7 \text{ m}^3$ par injection d'eau sous pression, présente un mode légèrement inférieur à $1 \mu\text{m}$ de diamètre. Ces deux distributions granulométriques, ainsi qu'une troisième présentant un mode intermédiaire autour de $10 \mu\text{m}$, ont été utilisées pour le calcul. Elles sont présentées dans le graphe de la figure 5.13.

L'observation des résultats, représentés dans les graphes de la figure 5.14 ne laisse aucun doute quant à l'influence de la microstructure du brouillard sur le filtrage fréquentiel du contraste. Pour les deux valeurs de la visibilité météorologique testées, la forme de la FTM correspond à la tendance prédite par la théorie basée sur la SAA : décroissance rapide vers une valeur asymptotique égale à la transmissivité $e^{-\tau}$, τ étant la densité optique considérée. La différence liée à la taille des gouttelettes de brouillard intervient dans les basses fréquences spatiales : on observe que plus les gouttelettes sont « grosses », mieux elles transmettent le contraste pour les fréquences inférieures à environ 5 cpd. Ces résultats corroborent les conclusions des expérimentations citées précédemment, dans lesquelles de petites gouttelettes avaient induit une FTC

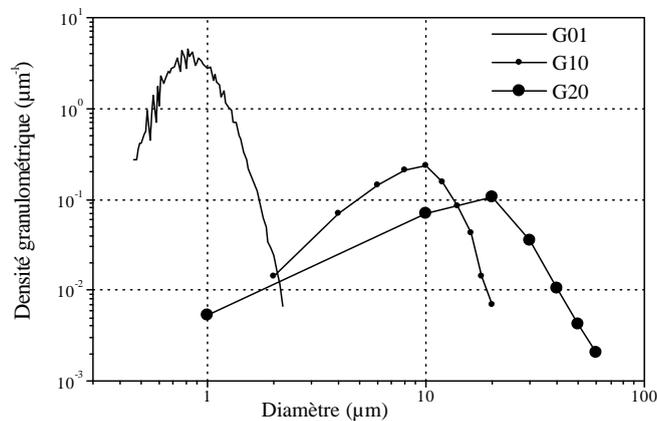


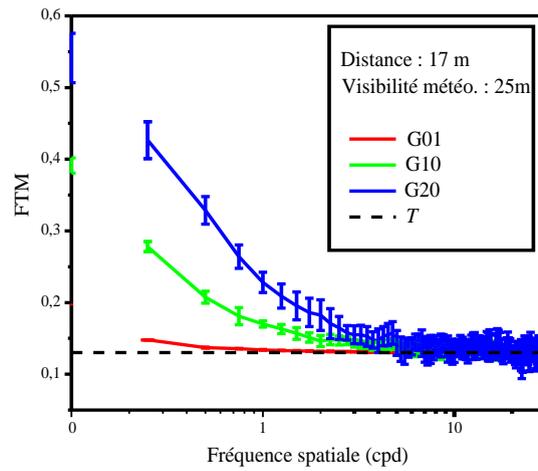
FIG. 5.13 – Distributions granulométriques utilisées pour étudier l'influence de la microstructure sur la FTM du brouillard. G01 : diamètre de mode inférieur au micron ; G10 : diamètre de mode égal à 10 µm ; G20 : diamètre de mode égal à 20 µm

uniforme, alors que de grosses gouttelettes avaient induit des FTC décroissantes.

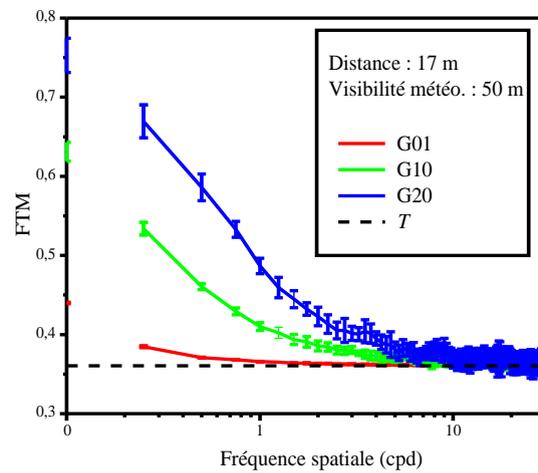
Le lien entre la forme de la FTM et la granulométrie du brouillard est fondé sur la forme de la fonction de phase (figure 1.6 en page 34). En effet, l'énergie lumineuse recueillie par le capteur après avoir traversé une tranche de brouillard se décompose en une partie transmise, qui n'a subi aucune interaction avec les gouttelettes, et une partie diffusée. L'énergie transmise est à l'origine de la composante uniforme de la FTM, égale à la transmissivité, conformément à la loi de Beer-Lambert. L'énergie diffusée provient de la lumière émise en dehors de l'axe émetteur-récepteur mais déviée par les gouttelettes vers le récepteur. Les gouttelettes de petite taille (diamètre inférieur au micron) diffusent la lumière selon une distribution spatialement uniforme ; il en résulte une forte dispersion spatiale de la lumière diffusée qui a pour effet de réduire l'importance de la composante diffuse recueillie par le capteur. Mais plus le diamètre des gouttelettes est important, plus la diffusion avant, dans la direction d'incidence, devient prépondérante ; la composante diffuse s'en trouve renforcée localement, autour de la composante transmise directement. En résumé, la composante transmise constitue une image nette mais atténuée du signal visuel, à laquelle s'ajoute une image floue (dépourvue de hautes fréquences spatiales) due à la diffusion, ce qui résulte en un effet de halo dont l'intensité croît avec la taille des gouttelettes du brouillard. C'est cet effet que permet de caractériser la FTM du brouillard.

5.3.2.2 Influence de la densité optique

Cependant, les perturbations engendrées dans le signal visuel par la transmission et la diffusion à travers une couche de brouillard ne dépendent pas uniquement de la taille des gouttelettes : pour une distribution granulométrique donnée, la FTM du brouillard dépend également de la concentration, représentée de façon équivalente par la visibilité météorologique V ou par le coefficient d'extinction K (d'après l'équation 1.26), et de la distance d'observation, qui définit



(a) Visibilité météorologique 25 m.



(b) Visibilité météorologique 50 m.

FIG. 5.14 – Influence de la taille des gouttelettes sur la FTM d'une tranche de brouillard de 17 m d'épaisseur. Les distributions granulométriques utilisées sont définies en figure 5.13.

l'épaisseur de la tranche de brouillard considérée. Il semble donc *a priori* impossible de caractériser le brouillard par une seule FTM, ce qui réduit considérablement l'intérêt de l'approche. En effet, l'environnement visuel d'un observateur dans le brouillard contient des éléments à de multiples distances.

Néanmoins, l'analogie entre une tranche de brouillard et un filtre linéaire est susceptible de fournir une solution à ce problème. En effet, d'après l'équation 5.12, il est possible de combiner plusieurs filtres linéaires pour obtenir un filtre lui-même linéaire, dont la fonction de transfert est égale au produit des fonctions de transfert des filtres dont il est constitué. Ainsi, pour un brouillard homogène de microstructure donnée, il doit être possible de considérer une tranche d'épaisseur d comme étant constituée d'une combinaison de tranches élémentaires d'épaisseurs d_0 , ainsi que l'illustre la figure 5.15. Cette propriété, si elle se vérifie, permet de déduire la FTM d'une tranche quelconque d'un brouillard donné à partir de la FTM d'une tranche donnée, et ce par l'intermédiaire d'une formule simple dans le domaine de Fourier :

$$M_d = M_{d_0}^{d/d_0} \quad (5.26)$$

où M_d est la FTM d'une tranche d'épaisseur d à calculer, et M_{d_0} la FTM donnée d'une tranche élémentaire d'épaisseur d_0 .

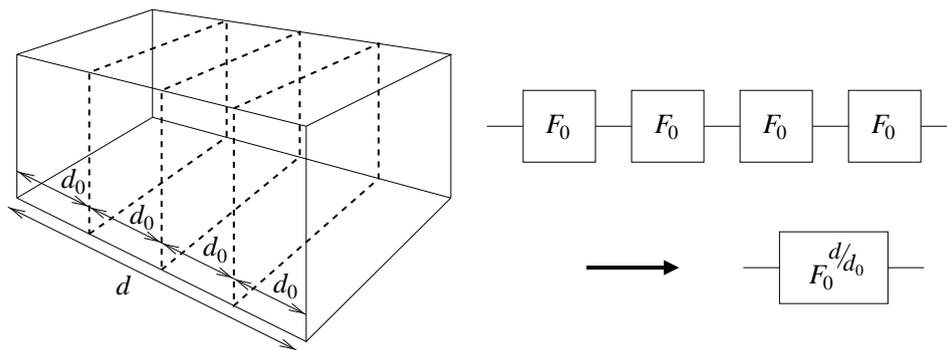


FIG. 5.15 – Application de la théorie des systèmes linéaires invariants pour généraliser la FTM d'une « tranche » de brouillard de granulométrie et de concentration données.

Lorsqu'elle est appliquée dans les études mettant en œuvre la FTM d'un milieu diffusant, cette propriété est généralement justifiée par l'expression de la FTM issue de l'approximation des petits angles [Jaf95]. Drofa *et al.* [DK81] vont même plus loin en proposant de généraliser la FTM non seulement sur la base de la distance, mais plus globalement sur la base de la densité optique :

$$M_\tau = M_{\tau_0}^{\tau/\tau_0} \quad (5.27)$$

où M_τ est la FTM d'une tranche de densité optique τ , et M_{τ_0} la FTM d'une tranche élémentaire de densité optique τ_0 .

Pour vérifier si cette propriété était applicable au brouillard, on a calculé par simulation la FTM de différentes tranches de brouillard, en faisant varier l'épaisseur et la concentration. Ces calculs ont été réalisés avec chacune des trois granulométries utilisées dans la partie 5.3.2.1

pour étudier l'influence de la taille des gouttelettes (figure 5.13). La disposition des détecteurs, définie dans la figure 5.12, a permis de traiter 5 valeurs d'épaisseur comprises entre 25 et 150 m. En échantillonnant la visibilité météorologique de la même façon que la distance (25, 50, 75, 100 et 150 m), on a pu recueillir la FTM de tranches de brouillard dotées de densités optiques comprises entre 0,5 et 18.

Malheureusement, même en utilisant un plus grand nombre de photons pour les cas où la densité est très importante, et malgré l'utilisation d'un capteur spécifique exploitant la symétrie de la réponse impulsionnelle, le bruit généré par la méthode de Monte-Carlo perturbe considérablement les résultats, comme en témoigne le graphe dans la figure 5.16. On constate que l'amplitude des variations entre plusieurs simulations des mêmes conditions croît avec la densité optique, pour atteindre un palier à 100% au-delà de 6. Le signal est alors noyé dans le

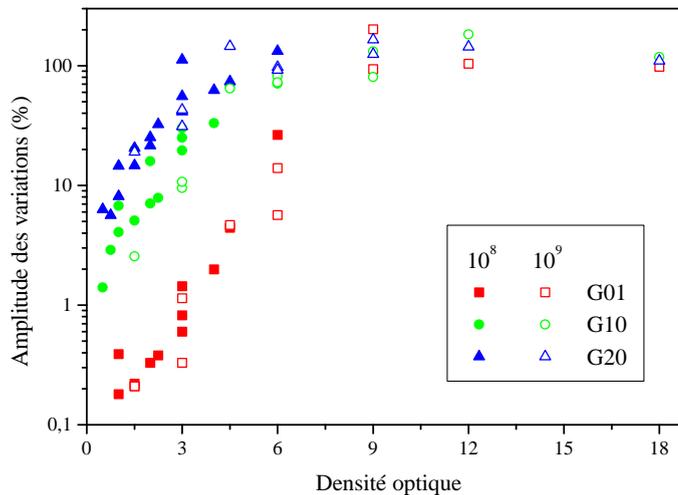


FIG. 5.16 – La méthode de Monte-Carlo utilisée pour calculer la FTM du brouillard génère un bruit qui a tendance à croître avec la densité optique (les granulométries G01, G10 et G20 sont définies dans la figure 5.13).

bruit, ce qui rend impossible l'exploitation des résultats pour les plus fortes valeurs de densité optique : 9, 12 et 18. Et même en deçà de la limite, l'amplitude de variation dans les résultats empêche la comparaison quantitative entre différentes fonctions de transfert de modulation. Il est donc difficile d'analyser les données autrement que graphiquement. Si ce mode d'analyse est peu satisfaisant d'un point de vue scientifique, il se justifie dans une certaine mesure lorsqu'on prend en compte l'incertitude importante sur les données microphysiques utilisées en amont pour calculer la fonction de phase du brouillard (nature chimique des gouttelettes, distribution granulométrique, homogénéité spatiale, etc.). Une investigation plus poussée nécessiterait soit l'utilisation d'un plus grand nombre de photons, soit la mise en œuvre d'une technique de simulation plus efficace. Mais on peut s'interroger sur l'intérêt de ce complément d'étude, étant

donné que la transmissivité, même si elle est globalement sous-estimée, décroît de façon exponentielle avec la densité optique, rendant rapidement insignifiante la contribution diffusée du signal transmis, surtout en présence des autres apports lumineux de l'environnement routier : lumière du ciel, éclairage public, éclairage automobile, etc. Il est intéressant de noter que parmi les études portant sur les propriétés de la FTM d'un milieu diffusant quel qu'il soit, rares sont celles qui ont cherché à produire une analyse quantifiée. Seul Jaffe [Jaf95], travaillant dans le domaine de l'imagerie sous-marine et utilisant une approche similaire à celle présentée plus haut (cf. section 5.3.1.3), avance une incertitude de plusieurs pourcents sur les FTM qu'il calcule par une technique de Monte Carlo, et évalue à quelques pourcents l'écart relatif entre ses calculs et ses prédictions basées sur l'équation 5.27.

Seuls les résultats pour des valeurs de densité optique inférieures ou égales à 6 doivent donc être considérés. Chaque FTM recueillie par simulation a été portée à la puissance inverse de la densité optique, afin de se ramener à la FTM d'une tranche de brouillard « équivalente » de densité optique unitaire, selon l'équation 5.27. Les résultats sont présentés dans les trois graphes de la figure 5.17. On observe une correspondance relative, avec des écarts de l'ordre d'une dizaine de pourcents, entre les courbes obtenues pour différentes densités optiques du même brouillard. Pour des densités optiques supérieures aux seuils indiqués précédemment, on observe que la FTM effectivement calculée est systématiquement supérieure à celle qu'on aurait pu déduire de la FTM d'une tranche de brouillard de densité optique inférieure en appliquant l'équation 5.27. Il n'est pas inconcevable que l'augmentation de la densité optique conduise à un changement de mode de transmission, la diffusion multiple prenant progressivement le pas sur la diffusion simple. Mais selon toute probabilité, ce complément d'énergie lumineuse viendrait s'ajouter au signal transmis de manière uniforme, induisant un accroissement de la composante continue (on observe effectivement cette tendance dans le cas des petites gouttelettes), mais en aucun cas un accroissement de la valeur asymptotique de la FTM dans les hautes fréquences spatiales. Quoiqu'il en soit, il est difficile d'analyser cette dérive par rapport à la théorie, car à de telles densités optiques, la transmissivité devient extrêmement faible (si $\tau > 6$, alors $T < 2\%$), et on a vu précédemment que les limites de la technique de simulation utilisée sont atteintes.

On peut néanmoins conclure que l'équation 5.27 est applicable au brouillard, tout au moins lorsque la densité optique est inférieure à 6, c'est-à-dire lorsque la distance d'observation est inférieure au double de la visibilité météorologique. Cette propriété est fondamentale, car elle rend pertinente la caractérisation des effets fréquentiels du brouillard sur le contraste par la FTM.

5.3.3 Influence des paramètres liés au mode de recueil de la FTM

Après avoir constaté l'équivalence entre la FTM d'une épaisseur de brouillard de densité optique inférieure ou égale à 6 et celle d'une épaisseur de granulométrie identique mais de densité optique unitaire, la suite de l'étude de l'influence des paramètres liés au mode de recueil de la FTM a porté sur une tranche de brouillard définie par une distance de 50 m et par une visibilité météorologique de 150 m.

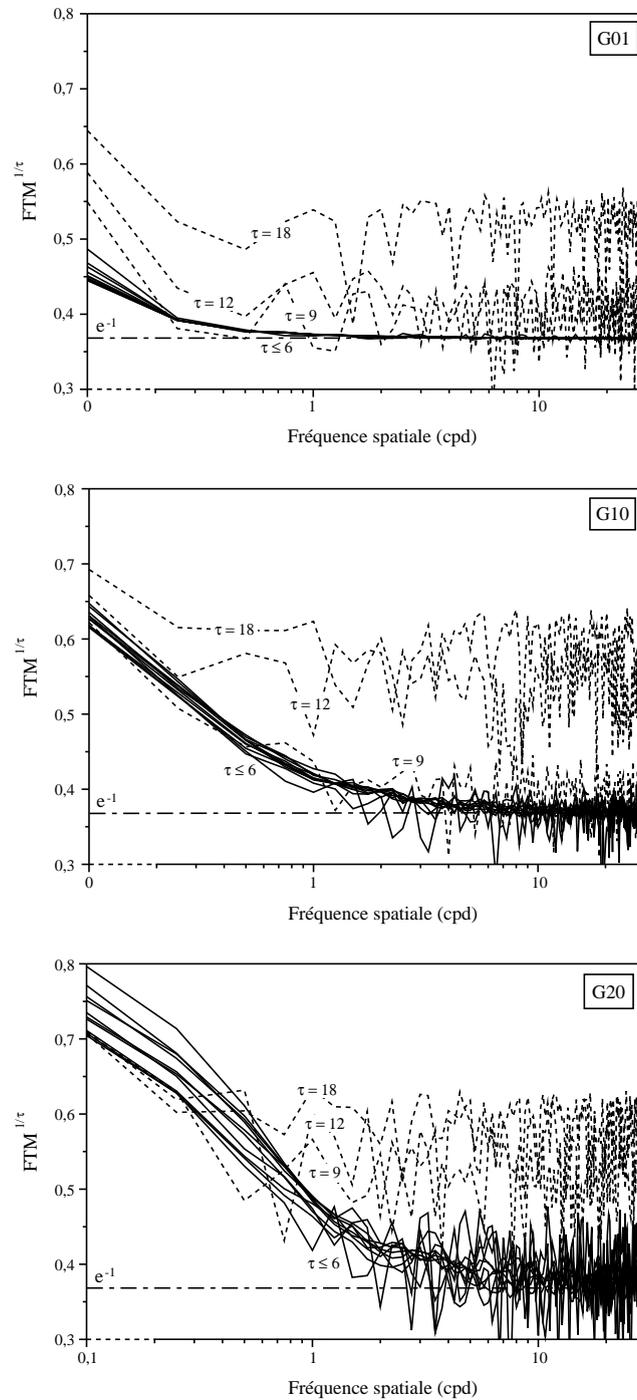


FIG. 5.17 – FTM calculées par simulation pour différentes granulométries (définies dans la figure 5.13), épaisseurs et concentrations, puis ramenées à une densité optique unitaire. Les courbes en trait discontinu correspondent à des résultats jugés non exploitables en raison du bruit.

5.3.3.1 Influence de l'ouverture du détecteur

Les caractéristiques du détecteur utilisé pour recueillir la réponse impulsionnelle d'une tranche de brouillard déterminent le spectre de fréquences spatiales pour lequel la FTM doit être calculée. La fréquence maximale et le pas d'échantillonnage dépendent à la fois de la définition du détecteur (le nombre de pixels) et de son ouverture angulaire (le champ de vision), comme le montre l'inégalité 5.16. Or on a vérifié précédemment que la FTM du brouillard était une fonction décroissante tendant dans les hautes fréquences vers une valeur asymptotique égale à la transmissivité, et ce d'autant plus rapidement que les gouttelettes sont de petite taille (figure 5.18). Il est donc souhaitable de préciser la partie basse du spectre.

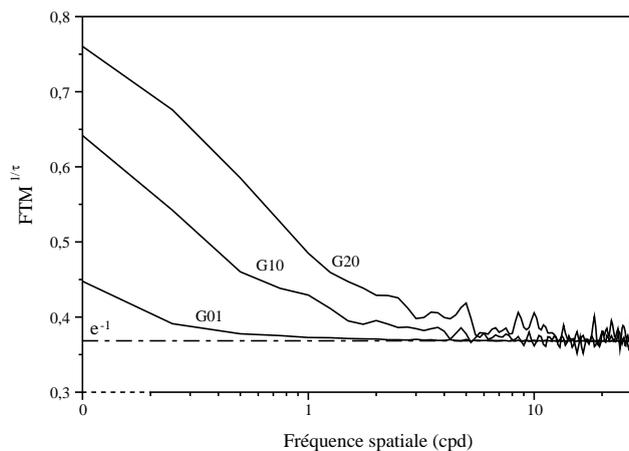


FIG. 5.18 – FTM d'une tranche de brouillard de densité optique unitaire en fonction de la granulométrie (cf. figure 5.13), obtenues à l'aide d'une source ponctuelle isotrope omnidirectionnelle et d'un détecteur de 4° d'ouverture.

Pour obtenir un échantillonnage plus fin de la FTM, il est nécessaire d'élargir l'ouverture du détecteur. L'augmentation de la définition du détecteur, indispensable si l'on voulait garder une fréquence maximale proche de la fréquence de coupure du système visuel humain, est ici inutile puisque ce sont les basses fréquences spatiales qui nous intéressent. Trois ouvertures angulaires supplémentaires ont été testées pour les détecteurs : 10° , 20° et 45° .

Les résultats confirment que la FTM est indépendante de l'ouverture du détecteur. Quelle que soit la granulométrie, les courbes calculées pour différentes ouvertures se confondent sur l'ensemble du spectre. La seule différence intervient pour la fréquence nulle, où on constate une augmentation progressive de la composante continue avec l'angle d'ouverture du récepteur. Cet accroissement, visible dans les graphes de la figure 5.19, était prévisible. En effet, avec un champ de détection plus large, le détecteur couvre un plus grand volume de brouillard, et capte une quantité plus importante d'énergie lumineuse diffusée. Ce supplément d'énergie accroît globalement la quantité d'énergie transmise, sans en modifier la distribution spatiale, ce qui se traduit dans le domaine de Fourier par une augmentation de la composante continue, qui représente la moyenne de l'énergie captée par le détecteur.

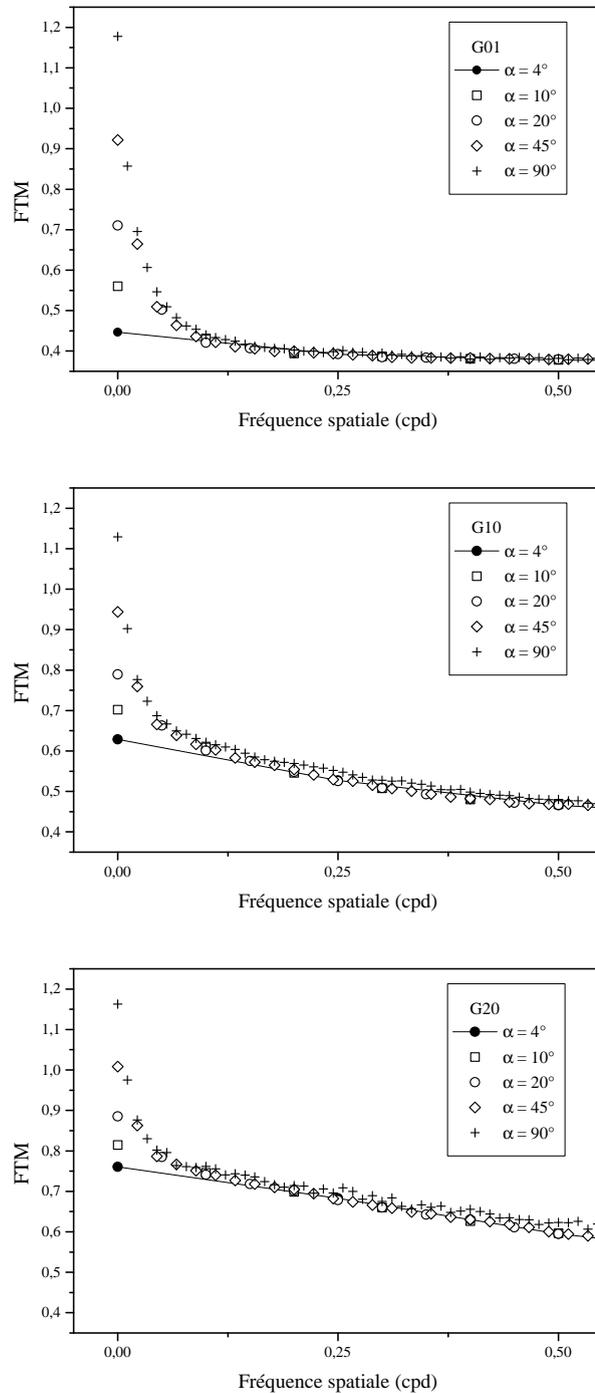


FIG. 5.19 – Seule la composante continue de la FTM varie avec l'angle d'ouverture du récepteur utilisé pour recueillir la réponse impulsionnelle d'une tranche de brouillard (les granularités G01, G10 et G20 sont définies dans la figure 5.13).

Il est à noter que la valeur de la FTM à la fréquence nulle est susceptible d'atteindre des valeurs supérieures à l'unité si le champ de réception est suffisamment ouvert, et ce d'autant plus que la taille des gouttelettes est importante ; la quantité totale d'énergie diffusée vers le détecteur en présence de brouillard est alors suffisante pour compenser l'extinction sur le trajet de la lumière entre la source et le détecteur. Mais même pour une distribution granulométrique dont le mode est de $20 \mu\text{m}$, il faut dépasser 45° d'ouverture en réception pour constater ce phénomène, qui est en contradiction avec la théorie des systèmes linéaires. C'est sans doute la raison pour laquelle il n'en est jamais fait mention dans les travaux sur la FTM des milieux diffusants : soit la nature chimique des particules diffusantes implique une absorption non négligeable qui contribue à diminuer la quantité globale d'énergie transmise (c'est le cas de la fumée ou de l'eau de mer), soit l'ouverture angulaire des récepteurs est faible pour conserver une résolution raisonnable même à des distances d'observation importantes (c'est le cas pour l'imagerie aérienne ou satellitaire).

5.3.3.2 Influence de l'ouverture de la source

Jusqu'ici, le calcul de la FTM d'une tranche de brouillard a été réalisé en recueillant l'image d'une impulsion lumineuse isotrope avec et sans brouillard, et en appliquant l'équation 5.20. Par conséquent, les effets du brouillard sur le contraste seront caractérisés à l'aide des FTM obtenues uniquement dans la mesure où l'on peut considérer que toutes les sources et les surfaces situées dans l'environnement visuel de l'observateur émettent et réfléchissent la lumière de manière isotrope. Cette hypothèse, qui est aussi à la base de l'approximation des petits angles, est rarement vérifiée dans la réalité.

En théorie, il faudrait donc calculer une FTM particulière pour chaque distribution directionnelle d'intensité lumineuse, ce qui est difficilement envisageable. De plus, le fait de considérer une asymétrie dans l'impulsion lumineuse induit la perte de la symétrie de la réponse impulsionnelle, ce qui introduit des distorsions de phase dans le signal transmis. Par conséquent, la FTM ne suffit plus à caractériser les perturbations engendrées par le brouillard. Les quelques études ayant abordé ce problème, citées par Drofa *et al.* [DK81], semblent être restées sans suite. La plupart des travaux sur le filtrage du contraste par un milieu diffusant considèrent, souvent de façon implicite, une émission symétrique autour de l'axe d'observation pour pouvoir étudier l'atténuation du contraste en amplitude sans avoir à prendre en compte la phase. Mais la symétrie n'implique pas l'isotropie, et selon la nature du signal considéré, il reste possible d'envisager diverses directivités d'émission.

On a donc étudié l'influence de l'ouverture angulaire de l'impulsion lumineuse sur la FTM, en utilisant la méthode décrite dans la partie 5.3.1.2. On a ainsi calculé, pour chacune des trois granulométries considérées précédemment, les FTM d'une tranche de brouillard de densité optique unitaire (avec une distance de 50 m et une visibilité météorologique de 150 m) pour des sources ponctuelles émettant de façon isotrope dans des cônes de différentes ouvertures, échantillonnées de façon non uniforme : 1° , 2° , 5° , 10° , 30° , 60° , 90° et 120° .

Les résultats, présentés dans les graphes de la figure 5.20, confirment que l'angle d'ouverture de la source a une influence importante sur la partie décroissante de la FTM. Cette influence est d'autant plus forte qu'on considère des fréquences spatiales basses, et la différence maximale

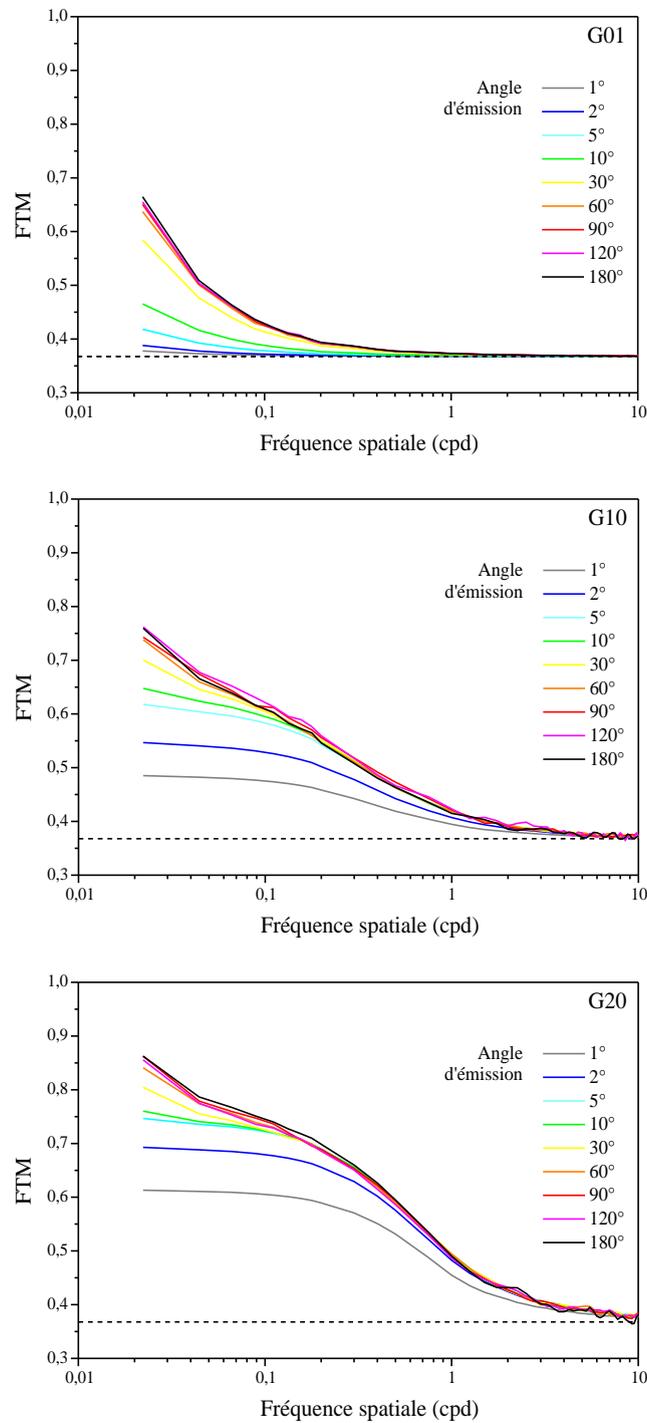


FIG. 5.20 – L'atténuation fréquentielle du contraste par le brouillard dépend de l'angle d'ouverture de la source émettant le signal (les granulométries G01, G10 et G20 sont définies dans la figure 5.13).

intervient au niveau de la composante continue. Ce résultat est conforme à ce qu'ont obtenu Brusaglioni *et al.* [BDIZ93] dans une étude similaire (bien que la normalisation de la FTM par la composante continue ne facilite pas l'interprétation). Cet effet arrive à saturation au-delà de 90° d'ouverture, quelle que soit la granulométrie. On note que la FTM du brouillard de petites gouttelettes (mode de distribution granulométrique inférieur au micron) est pratiquement uniforme et égale à la transmissivité lorsque la source émet un mince faisceau lumineux, alors que la FTM des brouillards constitués de gouttelettes plus grosses (modes à $10\ \mu\text{m}$ et plus) présente une décroissance dans les basses fréquences même pour un cône d'émission de seulement 1° d'ouverture.

On a établi précédemment que l'énergie dans le signal visuel perturbé par le brouillard se décomposait en une partie transmise directement, qui correspond au signal d'origine atténué exponentiellement selon la densité optique, et une partie diffuse, qui provient de la lumière diffusée dans la direction du récepteur. L'influence de l'angle d'ouverture du cône d'émission de la source confirme cette conclusion, et démontre que l'image défocalisée qui s'ajoute à l'image atténuée provient principalement de la lumière émise hors de l'axe source-détecteur.

5.4 Définition d'un opérateur fréquentiel de contraste

5.4.1 Interprétation de la FTM du brouillard

Les résultats obtenus précédemment par simulation sur la FTM du brouillard permettent de mieux comprendre les mécanismes par lesquelles la diffusion de la lumière perturbe le signal visuel perçu par un observateur.

Une partie de l'énergie lumineuse émise par un objet dans la direction d'un observateur interagit avec les gouttelettes d'eau, entraînant une atténuation exponentielle du signal en fonction de la distance, conformément à la loi de Beer-Lambert. Si les gouttelettes étaient parfaitement absorbantes, seule l'énergie transmise directement, sans interaction, contribuerait au signal visuel, et la FTM serait constante et égale à la transmissivité. Mais le brouillard est constitué principalement d'eau, et l'absorption est négligeable par rapport à la diffusion. Par conséquent, il est important de prendre en compte l'énergie lumineuse diffusée. Considérons donc l'énergie lumineuse émise par le même objet dans une direction autre que celle de l'observateur. Cette énergie interagit de la même façon avec les particules diffusantes, qui vont en dévier une partie vers l'observateur. La lumière émise par l'objet observé « éclaire », en quelque sorte, le brouillard. Les gouttelettes deviennent alors elles-mêmes des sources lumineuses dont l'énergie combinée contribue à la formation d'une image floue de l'objet qui s'ajoute à l'image atténuée transmise directement : les parties claires « bavent » sur les parties sombres [TL75]. Le brouillard génère ainsi un phénomène de halo d'autant plus important que le volume de brouillard éclairé est large.

Lorsque les gouttelettes constituant le brouillard sont de petite taille (diamètre inférieur au micron), la diffusion de la lumière est relativement isotrope. Il s'en suit que la quantité d'énergie lumineuse diffusée dans la direction de l'observateur varie peu en fonction de l'excentricité des gouttelettes dans son champ de vision. Par contre, lorsque la taille des gouttelettes augmente,

la majeure partie de l'énergie diffusée est émise dans des directions proches de la direction incidente. Il s'en suit que les gouttelettes les plus proches de l'axe d'observation contribuent de façon prépondérante à la partie diffusée du signal reçu par l'observateur. Ainsi, le phénomène de halo est d'autant plus intense et localisé que la taille des gouttelettes du brouillard est grande.

Naturellement, la distortion de l'image de l'objet transmise par le brouillard dépend de la distance d'observation. Toutefois, il est possible d'appliquer la propriété des filtres linéaires en cascade pour déduire les effets de n'importe quelle « épaisseur » de brouillard si la FTM d'une tranche élémentaire est connue. Il existe également une propriété d'homothétie qui fait qu'à granulométrie et à densité optique égales, la FTM du brouillard reste inchangée quelles que soient l'épaisseur et la concentration. Ces propriétés n'ont toutefois pu être vérifiées que pour des densités optiques inférieures à 6.

5.4.2 Définition de l'Opérateur Fréquentiel de Contraste du brouillard

Ainsi qu'il en a déjà été fait mention, la possibilité de généraliser la FTM d'une couche de brouillard d'épaisseur élémentaire est une propriété fondamentale. En effet, contrairement au cas de l'observation longue-distance où la variabilité des distances dans le champ de réception des capteurs est faible, l'infrastructure routière contient des éléments à des distances extrêmement variées dans le champ visuel de l'automobiliste. Chacun de ces éléments se trouve séparé de l'observateur par une épaisseur différente du même brouillard, caractérisée par sa propre FTM. La caractérisation des perturbations du signal visuel dans le brouillard par l'intermédiaire de la FTM serait donc impossible sans la possibilité de généraliser la FTM d'une épaisseur élémentaire de brouillard. Il est même envisageable de déduire la FTM d'un brouillard plus ou moins dense, en considérant que la granulométrie reste inchangée. Il est ainsi théoriquement possible d'associer une FTM unique à chaque granulométrie de brouillard.

On propose donc de caractériser les modifications induites par la transmission du signal visuel à travers le brouillard par un opérateur fréquentiel de contraste (OFC) égal à la FTM (non normalisée) d'une épaisseur de densité optique unitaire.

Cet opérateur F est obtenu de façon simple à partir de la FTM, $M(K_0, d_0)$, calculée ou mesurée pour des valeurs particulières de la distance d_0 et du coefficient d'extinction K_0 en utilisant l'équation 5.27 :

$$F = M_{K_0, d_0}^{\frac{1}{K_0}} = M_{K_0, d_0}^{\frac{1}{K_0 d_0}} \quad (5.28)$$

Toujours d'après l'équation 5.27, F peut ensuite être utilisé pour calculer la FTM d'une tranche d'épaisseur quelconque d du même brouillard, même en considérant une visibilité météorologique différente V (liée au coefficient d'extinction K par l'équation 1.26), à condition toutefois que la densité optique soit inférieure à 6 (ie. $d \leq 2V$) :

$$M_{K, d} = F^{Kd} \simeq F^{\frac{3d}{V}} \quad (5.29)$$

Il est important de noter que l'utilisation de l'OFC ne permet qu'une description approximative de l'effet de halo produit par la lumière diffusée. En effet, l'hypothèse selon laquelle chaque point de la scène émet ou réfléchit la lumière d'une manière symétrique autour de la

direction de l'observateur est une grossière approximation par rapport à la distribution directionnelle des flux lumineux émis et réfléchis par les surfaces dans un environnement routier réel (les projecteurs de véhicule, notamment).

5.5 Conclusion

La mise en œuvre du code de simulation de la diffusion multiple de la lumière dans un milieu polydispersé présenté dans le chapitre 4 a permis d'étudier l'effet des divers paramètres influents sur la FTM du brouillard.

On a ainsi établi que l'image d'un objet observé à travers une épaisseur de brouillard se compose d'une partie transmise sans diffusion qui correspond à l'image non dégradée atténuée d'un facteur égal à la transmissivité, et d'une partie diffusée qui correspond à l'image non dégradée plus ou moins filtrée de ses hautes fréquences spatiales selon la taille des gouttelettes. La diffusion contribue ainsi à un phénomène de halo variable avec la granulométrie : de grosses gouttelettes génèrent un halo intense et localisé, alors que de petites gouttelettes génèrent un halo ténu et étendu. Toutefois, l'importance de ce phénomène diminue si l'objet émet ou réfléchit la lumière de façon directive vers l'observateur.

L'influence de la microstructure du brouillard sur la visibilité est donc confirmée, et rend pertinente la description fréquentielle de l'atténuation du contraste pour caractériser les perturbations induites par le brouillard dans l'environnement visuel de l'utilisateur de la route de façon plus complète qu'avec la seule transmissivité. La possibilité de généraliser la FTM d'une tranche de brouillard d'épaisseur et de concentration quelconques rend la caractérisation indépendante de ces paramètres. L'Opérateur Fréquentiel de Contraste, égal à la FTM pour une densité optique unitaire, a ainsi été défini pour caractériser le filtrage fréquentiel du contraste par le brouillard.

Avec cette nouvelle compréhension des mécanismes conduisant à la perte de visibilité en conditions de conduite dans le brouillard, il est possible d'entreprendre la modélisation des perturbations subies par signal visuel, dans le but de mettre au point une méthode pour simuler les effets visuels du brouillard par traitement d'images.

Chapitre 6

Simulation des effets du brouillard sur l'environnement visuel de l'utilisateur de la route

Le filtrage fréquentiel des contrastes dans le brouillard, abordé dans le chapitre précédent, permet de décrire l'effet de halo dû à la diffusion par les gouttelettes en suspension entre une source lumineuse et l'observateur. Mais le phénomène de diffusion intervient dans tout l'espace entourant l'observateur, et perturbe l'ensemble des échanges lumineux qui ont lieu entre les éléments de la scène dans laquelle il évolue.

On a vu dans le chapitre 3 qu'il était possible de simuler ces interactions entre le brouillard et la lumière afin de synthétiser l'image d'une scène perçue par un observateur. Mais cette approche demande des calculs extrêmement longs, au point qu'il est peu raisonnable d'envisager d'utiliser la synthèse d'images de façon opérationnelle pour étudier les effets visuels du brouillard dans un environnement aussi complexe que l'infrastructure routière. Il est certainement plus efficace de simuler directement l'impact de la diffusion de la lumière dans le signal visuel que le phénomène lui-même. C'est pourquoi le traitement d'images fournit une approche alternative intéressante, à condition de pouvoir décrire les perturbations engendrées par le brouillard sous la forme d'une chaîne de transformations subies par une image non perturbée.

Dans ce chapitre, les mécanismes par lesquels le brouillard dégrade le signal visuel de l'utilisateur de la route sont tout d'abord analysés. Trois effets visuels majeurs sont identifiés et quantifiés. Un modèle photométrique de ces effets sur le signal visuel est alors proposé. La mise en œuvre de ce modèle pour simuler les effets visuels du brouillard par traitement d'images est ensuite décrite, et l'application sur simulateur de conduite est finalement abordée.

6.1 Analyse des mécanismes de perturbation du signal visuel par le brouillard

6.1.1 Décomposition du signal visuel

Rappelons pour commencer que le signal visuel désigne la distribution de luminance générée par l'environnement routier dans le champ visuel de l'utilisateur. Chaque élément, ou pixel, de cette image optique correspond à une direction d'observation, et pointe vers un élément de la scène observée situé à une certaine distance de l'observateur. L'infrastructure routière contient deux types d'éléments : les surfaces émissives et les surfaces réfléchissantes. La raison de cette distinction tient à la complexité du trajet suivi par la lumière avant d'atteindre l'œil de l'observateur, illustré dans le schéma de la figure 6.1. Car c'est justement le long de ce trajet que la lumière subit le phénomène de diffusion en présence de brouillard, transformant la valeur « intrinsèque » de la luminance des objets – valeur que l'on pourrait mesurer en plaçant un luminancemètre à courte portée [Mid52] – en valeur « apparente » perçue par l'observateur.

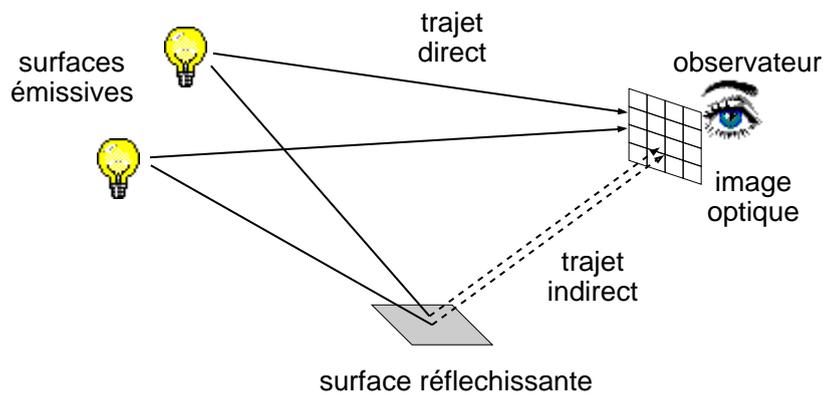


FIG. 6.1 – L'image optique de l'environnement routier se compose de zones primaires et secondaires, selon que les surfaces visées sont émissives ou réfléchissantes.

6.1.1.1 Les zones primaires

Dans le cas des surfaces émissives, telles que les sources d'éclairage public, ou les feux et les projecteurs de véhicule, la lumière suit un trajet direct entre la surface et l'observateur. Les pixels de l'image optique pointant sur de telles surfaces forment les zones primaires du signal visuel.

D'après les lois de la photométrie [DeC97], il est possible d'exprimer la luminance intrinsèque L_{emi} d'une surface émissive en fonction de l'intensité I émise en direction de l'observateur et de sa surface apparente $A \cos \theta$ de la source, θ étant l'angle entre la normale à la surface et la direction d'émission :

$$L_{\text{emi}} = \frac{I}{A \cos \theta} \quad (6.1)$$

6.1.1.2 Les zones secondaires

Les surfaces réfléchissantes, telles que la chaussée, ou la signalisation horizontale et verticale, reçoivent l'énergie lumineuse émise par les sources naturelles (le ciel) et les sources artificielles environnantes (éclairage public et automobile). La lumière, dans ce cas, doit d'abord traverser l'espace qui sépare les différentes sources de la surface, avant de traverser l'espace qui sépare cette surface de l'observateur, ce qui implique des trajets complexes. Les pixels de l'image optique pointant sur de telles surfaces forment les zones secondaires du signal visuel.

De jour, le ciel est la principale source d'énergie lumineuse. Il génère dans tout l'environnement un éclairage globalement uniforme dont le niveau dépend de la date et de l'heure, du lieu géographique et des conditions météorologiques [CIE96]. Une surface ainsi éclairée réfléchit une partie de la lumière reçue en direction de l'observateur, en proportion plus ou moins importante selon ses caractéristiques photométriques, donnant lieu à une luminance intrinsèque L_0 .

De nuit, l'illumination vient principalement des sources lumineuses artificielles. Chaque élément de surface est éclairé par un certain nombre de sources, et chacune de ces sources contribue pour partie à la luminance intrinsèque de la surface. En toute rigueur, il faudrait également tenir compte de l'éclairage indirect, dû à des réflexions multiples entre les surfaces ; toutefois, dans les environnements routiers ouverts où le brouillard est susceptible d'apparaître, on peut raisonnablement négliger cette composante de l'éclairage.

De façon plus générale, la luminance intrinsèque L_{ref} d'une surface réfléchissante se décompose donc en une partie L_0 due à l'éclairage ambiant, et une partie due à l'éclairage produit par un certain nombre n de sources lumineuses, chacune générant une partie $L_{s \in [1, n]}$ de la luminance totale :

$$L_{\text{ref}} = L_0 + \sum_{s=1}^n L_s \quad (6.2)$$

6.1.2 Décomposition des perturbations engendrées par le brouillard

Le brouillard, ainsi qu'on l'a vu dans le premier chapitre, est une forte concentration de gouttelettes d'eau en suspension dans l'air. Lorsque la lumière visible se propage à travers ce milieu, elle subit principalement le phénomène de diffusion, l'absorption étant négligeable : les gouttelettes dispersent le flux lumineux selon une distribution spatiale qui dépend de leur taille. En perturbant la propagation de la lumière entre les différents éléments de l'environnement et l'observateur, la diffusion induit trois effets majeurs dans le signal visuel : l'extinction, le halo et les voiles.

6.1.2.1 L'effet d'extinction

L'extinction est la principale conséquence du brouillard. Lorsque la lumière parcourt l'espace séparant deux points dans le brouillard, une partie du flux lumineux transporté est perdue à cause de la diffusion. Selon la loi d'atténuation exponentielle de Beer-Lambert [Mid52], la proportion de flux transmis est égale à la transmissivité e^{-Kd} , où K est le coefficient d'extinction et d la distance parcourue.

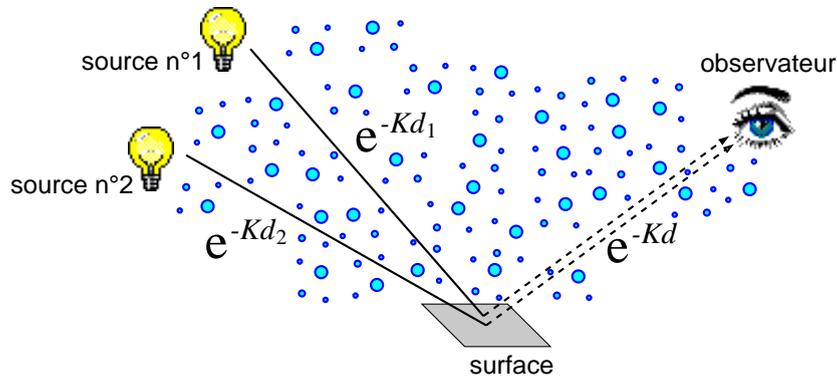


FIG. 6.2 – L'effet d'extinction agit doublement sur la luminance des zones secondaires du signal visuel.

L'effet d'extinction intervient sur tous les trajets suivis par la lumière avant d'atteindre l'observateur. Au niveau des zones primaires du signal visuel, il s'en suit une atténuation exponentielle de la luminance apparente des surfaces émissives en fonction de leur profondeur dans le brouillard. Au niveau des zones secondaires, l'effet est multiplié, car comme le montre la figure 6.2, l'extinction a lieu une première fois le long des trajets entre les sources lumineuses et les surfaces, atténuant l'éclairement reçu (et proportionnellement la luminance intrinsèque), et une deuxième fois sur le trajet séparant les surfaces de l'observateur, atténuant la luminance apparente.

6.1.2.2 L'effet de halo

On a établi dans le chapitre précédent qu'une partie de la lumière artificielle diffusée par les gouttelettes de brouillard le long des trajets lumineux vers l'observateur était susceptible de contribuer à la formation d'un effet de halo dans le signal visuel (figure 6.3). À l'image atténuée par l'effet d'extinction s'ajoute alors une image défocalisée, filtrée de ses hautes fréquences spatiales, de l'objet observé. La forme du halo dépend de la granulométrie du brouillard : plus la taille des gouttelettes est importante, plus le halo est intense et localisé. Naturellement, cet effet dépend également de la distance d'observation.

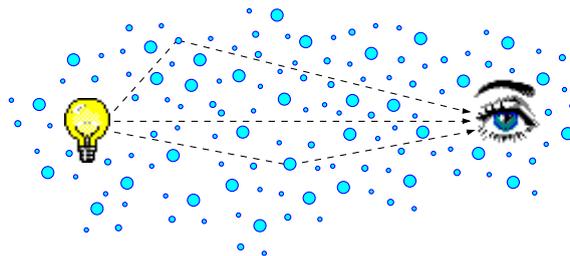


FIG. 6.3 – L'effet de halo autour des zones primaires du signal visuel est dû à la lumière diffusée.

En toute rigueur, ce phénomène doit être pris en compte dans l'ensemble du signal visuel, au niveau des zones primaires et secondaires. En pratique, l'effet de halo est insignifiant au niveau des zones secondaires, même lorsqu'elles correspondent à des surfaces fortement réfléchissantes (marquages, panneaux), car leur luminance est toujours inférieure à celle des zones primaires, et parce qu'elles subissent doublement l'effet d'extinction. De plus, l'importance de l'effet de halo est atténuée par les effets de voile introduits ci-après.

6.1.2.3 Les effets de voile

Le voile atmosphérique

En conditions diurnes, les gouttelettes d'eau en suspension dans l'air contribuent à augmenter la luminance apparente des éléments de l'environnement en diffusant une partie de la lumière qu'elles reçoivent du soleil et du ciel (diffusion simple), ainsi que des autres gouttelettes (diffusion multiple), dans la direction de l'observateur (figure 6.4). La diffusion de la lumière naturelle par le brouillard génère ainsi un « voile » qui s'interpose entre l'observateur et son environnement, dans lequel se fondent et disparaissent progressivement les objets distants.

La luminance de voile atmosphérique dépend naturellement de la luminance du brouillard, c'est-à-dire de la luminance de voile pour une distance infinie, elle-même dépendante des conditions d'illumination, et par conséquent de la position géographique, de la date et de l'heure, ainsi que des conditions météorologiques (ciel clair ou couvert) au moment de l'observation. Les travaux récents de Paulmier [Pau02] montrent que la luminance du brouillard varie non seulement en fonction de la direction d'observation par rapport au soleil comme prévu par Middleton [Mid52], mais également de l'épaisseur optique de la couche de brouillard (produit de la hauteur par le coefficient d'extinction) et de la granulométrie, avec des niveaux compris entre une centaine et plusieurs dizaines de milliers de candelas par mètre carré.

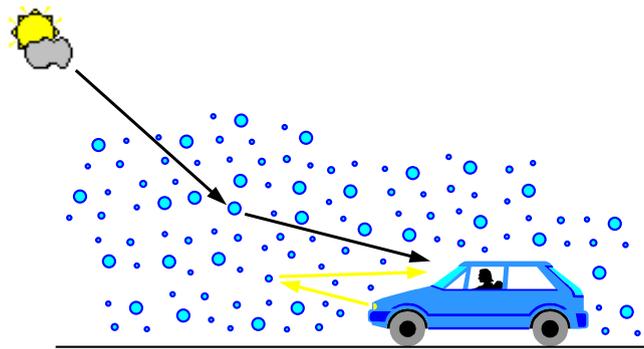


FIG. 6.4 – Les effets de voile sont dus à la diffusion de la lumière du jour et à la rétrodiffusion de la lumière des phares.

Le voile rétrodiffusé

Lorsque l'observateur est un conducteur au volant de son véhicule, le code de la route lui impose d'allumer ses feux de croisement par temps de brouillard^{1,2}. Le flux lumineux émis par ces sources interagit avec les gouttelettes de brouillard à l'avant du véhicule, et une partie est rétrodiffusée vers le conducteur (figure 6.4). Les projecteurs du véhicule contribuent ainsi à la formation d'un voile supplémentaire entre l'observateur et la scène routière, voile qui peut s'avérer gênant si les projecteurs sont mal réglés. Mais contrairement à la luminance de voile atmosphérique qui augmente avec la distance des objets observés, la luminance de voile rétrodiffusée peut raisonnablement être considérée comme indépendante de la scène.

Par contre, ce voile dépend à la fois des caractéristiques des projecteurs du véhicule et de la microstructure du brouillard. D'une part, le flux rétrodiffusé est directement proportionnel au flux des projecteurs, ce qui laisse prévoir que les lampes à décharge équipant les véhicules récents créent un voile plus important que les classiques lampes halogènes. D'autre part, les grosses gouttelettes favorisent la diffusion vers l'avant, et par conséquent réduisent le voile rétrodiffusé. Des simulations de mesures photométriques réalisées avec le code de simulation PROF présenté au chapitre 4 ont montré que la luminance maximale dans le voile rétrodiffusée ne dépasse pas le candela par mètre carré (figure 6.5) ; Rosenhahn [Ros01], qui a étudié l'influence de la répartition directionnelle du flux émis par les projecteurs sur la luminance rétrodiffusée, présente des ordres de grandeur similaires.

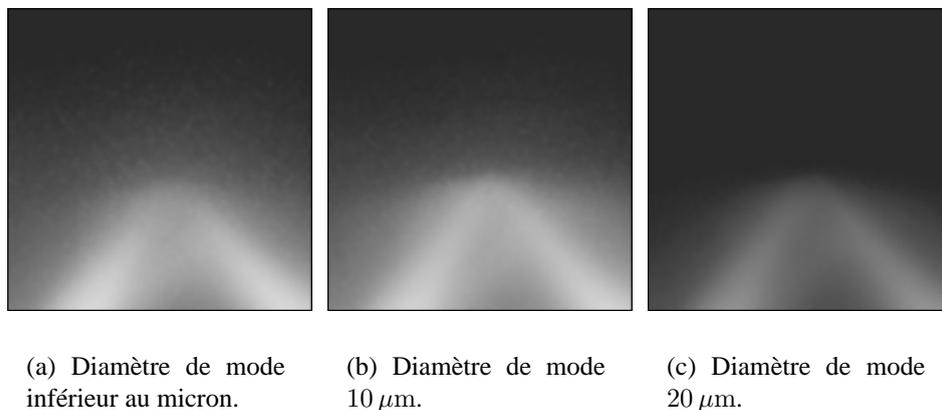


FIG. 6.5 – Exemples de distribution de luminance de voile rétrodiffusé obtenues par simulation, dans une portion de 45° du champ visuel du conducteur d'un véhicule de type Peugeot 205 dont les projecteurs sont allumés en position feux de croisement, pour différents types de brouillard avec une visibilité météorologique de 40 m. Les yeux de l'observateur sont à 1,2 m de hauteur ; les projecteurs à 0,6 m au-dessus du sol, et écartés de 1 m.

1. Article R40 du Code de la Route (Livre Ier, Titre Ier, Paragraphe VIII).

2. Les projecteurs antibrouillard ne sont pas obligatoires, mais sont susceptibles d'accroître la luminance de voile rétrodiffusé lorsqu'ils sont allumés [Ric].

6.2 Modélisation photométrique des effets visuels du brouillard

Ayant identifié les mécanismes à l'origine de la perturbation du signal visuel par le brouillard et les effets qui en résultent dans l'image de la scène routière perçue par l'utilisateur, on est à même d'en proposer un modèle photométrique.

6.2.1 La théorie de Koschmieder

Koschmieder fut le premier, en 1924, à aborder quantitativement la visibilité horizontale des objets quand on les observe sur le ciel à l'horizon, en calculant la luminance d'un cône d'air sous l'effet de l'éclairage naturel. Cette analyse théorique, rapportée par Middleton dans son ouvrage de référence sur la vision dans l'atmosphère [Mid52], a conduit à l'expression classique de la luminance apparente d'un objet noir, égale à la luminance de voile atmosphérique :

$$L_a(d) = (1 - e^{-Kd})L_h \quad (6.3)$$

où K est le coefficient d'extinction de l'atmosphère, d est la distance séparant l'objet de l'observateur, et L_h est la luminance du ciel à l'horizon. Les principales hypothèses de Koschmieder étaient que le coefficient d'extinction doit être constant dans le plan horizontal d'observation, que l'éclairement provenant du ciel doit être spatialement uniforme et que les dimensions de l'objet doivent être petites par rapport à la distance d'observation.

Lorsque l'objet observé n'est pas noir, à la luminance de voile atmosphérique s'ajoute la luminance intrinsèque de l'objet, atténuée par la transmissivité, ce qui permet d'exprimer la luminance apparente d'un objet quelconque sous une forme très simple :

$$L(d) = e^{-Kd}L_0 + (1 - e^{-Kd})L_h \quad (6.4)$$

où L_0 est la luminance intrinsèque de l'objet considéré, provenant de l'éclairage naturel.

Middleton, reprenant une analyse de Duntley datée de 1948, parvient à une expression analogue de la luminance apparente d'un objet en vision oblique, et l'applique notamment pour évaluer le contraste d'un objet se profilant sur le sol, et plus généralement sur un fond autre que le ciel.

6.2.2 Modèle photométrique étendu

La loi de Koschmieder, telle qu'elle est écrite dans l'équation 6.4, fournit un modèle tout-à-fait acceptable pour prédire la distribution de luminance apparente dans le champ visuel d'un observateur dans le brouillard. Toutefois, elle ne s'applique qu'à des scènes diurnes ne contenant aucun objet lumineux, car elle ne prend pas en compte l'éclairage artificiel et néglige l'effet de halo. Ces limitations restreignent considérablement l'utilité du modèle pour les études de visibilité routière, dans lesquelles il est indispensable d'intégrer la signalisation et l'éclairage automobiles, ainsi que les situations de brouillard nocturne. On a donc entrepris d'étendre la loi de Koschmieder afin d'en faire un modèle adapté à l'étude de la perception visuelle de l'infrastructure en toutes situations de circulation.

6.2.2.1 Atténuation des zones secondaires

Considérons en premier lieu les zones secondaires du signal visuel, qui correspondent à des surfaces dont l'éclairement est susceptible de provenir à la fois de l'éclairage naturel du ciel et de l'éclairage artificiel des sources lumineuses environnantes. Par temps clair, ces surfaces donnent lieu à des luminances qui s'expriment sous la forme de l'équation 6.2. En présence de brouillard, l'effet d'extinction agit en premier lieu sur l'éclairement artificiel, atténuant de façon exponentielle la contribution de chaque source à la luminance intrinsèque $L_{\text{ref}}(0)$ d'un élément de surface :

$$L_{\text{ref}}(0) = L_0 + \sum_{s=1}^n e^{-Kd_s} L_s \quad (6.5)$$

où K est le coefficient d'extinction du brouillard, L_0 est la luminance intrinsèque de la surface provenant de l'éclairage naturel, et L_s est la contribution sans brouillard d'une des n sources environnantes à la luminance de l'élément de surface dont elle est séparée d'une distance d_s . L'effet d'extinction induit à nouveau une atténuation exponentielle de la luminance apparente de la surface distante de l'observateur :

$$\begin{aligned} L_{\text{ref}}(d) &= e^{-Kd} L_{\text{ref}}(0) \\ &= e^{-Kd} \left(L_0 + \sum_{s=1}^n e^{-Kd_s} L_s \right) \end{aligned} \quad (6.6)$$

où d est la profondeur de l'élément de surface considéré dans le champ visuel de l'observateur.

6.2.2.2 Convolution des zones primaires

Considérons ensuite les zones primaires du signal visuel, qui correspondent à des surfaces émettant leur propre flux lumineux. En présence de brouillard, l'image de ces sources subit l'effet de halo, équivalent à une convolution par la réponse impulsionnelle de la couche de brouillard séparant l'élément de surface émissive considéré de l'observateur. Cette réponse est égale à la transformée de Fourier inverse de la fonction de transfert de modulation $M(K, d)$. On peut donc exprimer la luminance apparente d'une zone primaire sous la forme suivante, grâce à l'équation 5.29 :

$$\begin{aligned} L_{\text{emi}}(d) &= L_{\text{emi}}(0) * \mathcal{F}^{-1} \{M(K, d)\} \\ &= L_{\text{emi}}(0) * \mathcal{F}^{-1} \{F^{Kd}\} \end{aligned} \quad (6.7)$$

où F est l'opérateur fréquentiel de contraste (OFC) du brouillard, défini dans le chapitre précédent, K est son coefficient d'extinction, d est la distance par rapport à l'observateur, et $L_{\text{emi}}(0)$ est la luminance intrinsèque de la source, exprimée par l'équation 6.1.

L'application du filtrage d'une image par la FTM du milieu diffusant a déjà été tentée par le passé pour prédire les effets du brouillard [Nam92, SDZ00] (et de la fumée [BRBD96]) sur un signal lumineux, mais s'est toujours heurtée au problème de la variation du halo en fonction de la distance. L'utilisation de l'OFC permet de contourner cette difficulté.

6.2.2.3 Addition des luminances de voile

Ayant formalisé les effets d'extinction et de halo sur l'image optique d'une scène observée dans le brouillard, il reste à considérer les effets de voile. Si le ciel délivre un tant soit peu d'éclairage, il faut ajouter la luminance de voile atmosphérique, donnée par l'équation 6.3 en remplaçant la luminance du ciel à l'horizon L_h par la luminance du brouillard dans la direction d'observation L_b . Si l'observateur conduit un véhicule dont les projecteurs sont allumés, il faut en outre ajouter la luminance de voile rétrodiffusé L_r . On obtient ainsi une expression générale de la luminance apparente dans toutes les directions du champ visuel :

$$L = L_{\text{obj}}(d) + (1 - e^{-Kd}) L_b + L_r \quad (6.8)$$

où $L_{\text{obj}}(d)$ est donnée par l'équation 6.6 ou 6.7 selon que l'observateur regarde dans la direction d'un objet réfléchissant ou lumineux, d est la profondeur de cet objet dans la scène, et K est le coefficient d'extinction du brouillard.

L'équation 6.8 prend ainsi en compte les trois effets majeurs du brouillard décrits précédemment, et permet de quantifier leur impact sur le signal visuel perçu par un conducteur de jour, mais aussi de nuit ou en condition crépusculaire. Elle peut donc être utilisée pour modéliser photométriquement les effets visuels du brouillard pour l'usager de la route.

6.2.3 Hypothèses et limites du modèle

Il est important de noter que le modèle étendu des effets visuels du brouillard établi précédemment repose sur de nombreuses hypothèses et approximations.

6.2.3.1 Uniformité spatiale du brouillard

Middleton [Mid52] rappelle que la théorie de Koschmieder, sur laquelle est basé le modèle proposé, repose sur certaines hypothèses qui ne sont, le plus souvent, qu'approximativement vérifiées. C'est le cas, notamment, pour l'uniformité spatiale de l'atmosphère et de l'éclairage naturel. En effet les variations spatiales du coefficient d'extinction ne sont pas rares dans le brouillard (effet de nappe), et sauf par temps très clair et sans nuage, il faut s'attendre à des variations spatiales de l'éclairement horizontal. Par conséquent, il est impossible de considérer les situations, pourtant très accidentogènes [ONI01], de transition entre une zone où la visibilité est normale et une zone de brouillard dense.

6.2.3.2 Dimensions des objets

Une autre hypothèse de Koschmieder concerne les dimensions des objets dont il calcule la luminance apparente. Middleton [Mid52] précise qu'on risque de surestimer la luminance de voile atmosphérique en appliquant l'équation 6.3 pour des objets dont la taille n'est pas petite par rapport à la distance d'observation dans des conditions de faible visibilité, par un effet d'ombre dont l'influence est confirmée par des travaux plus récents [KZ94, GVP97].

6.2.3.3 Isotropie des sources lumineuses

La caractérisation du phénomène de halo autour des sources lumineuses par la réponse impulsionnelle du brouillard ne vaut théoriquement que lorsque l'émission est isotrope, ou tout au moins symétrique autour de la direction d'observation. Si cette hypothèse est relativement acceptable pour la signalisation lumineuse et les feux à l'arrière des véhicules, il en va rarement de même pour l'éclairage public et l'éclairage automobile, dont les solides photométriques complexes se matérialisent dans le brouillard du fait de la diffusion (figure 6.6).



FIG. 6.6 – Exemples de matérialisation du solide photométrique des sources lumineuses dans le brouillard.

De même, il est nécessaire qu'une source lumineuse soit visible dans le signal visuel, et donc non occultée dans la scène, pour pouvoir donner lieu au filtrage de l'équation 6.7. Il faut également que l'espace qu'elle illumine soit dégagé de tout objet susceptible d'empêcher la lumière diffusée d'atteindre l'observateur.

6.2.3.4 Prise en compte de l'éclairage indirect

En présence d'éclairage artificiel, seule la lumière transmise sans diffusion est prise en compte par le modèle étendu pour estimer l'éclairement des surfaces. Cette approximation est susceptible de conduire à une légère sous-estimation de la luminance intrinsèque des surfaces claires lorsqu'elles sont situées à courte portée d'une source lumineuse, comme dans le cas de la carrosserie d'un véhicule autour des feux et des projecteurs.

6.2.3.5 Gestion de la couleur

Le modèle, tel qu'il est présenté, décrit les effets purement photométriques du brouillard, et ne traite pas les aspects colorimétriques. L'extension à un modèle spectral est néanmoins facile : il suffit de remplacer les grandeurs photométriques par des grandeurs radiométriques, fonctions de la longueur d'onde. La prise en compte de chaque source lumineuse étant indépendante, il est même possible, dans certains cas, de calculer les effets photométriques du brouillard pour chaque source, et d'associer la chrominance de cette source aux résultats, pour finalement cumuler l'ensemble des contributions dans l'espace colorimétrique additif XYZ. Cette technique

est toutefois réservée aux scènes dont les surfaces peuvent être considérées comme « grises » (dotées d'un spectre de réflexion relativement uniforme). Elle a été mise en œuvre pour des expérimentations réalisées par des psychologues de la conduite en vue de vérifier que le modèle induisait bien la surestimation des distances constatée en brouillard artificiel [CDG02] ; les résultats ont été relativement satisfaisants, mais ont surtout permis de souligner le problème de la prise en compte de la dynamique limitée des systèmes d'affichage, notamment pour la simulation de situations nocturnes.

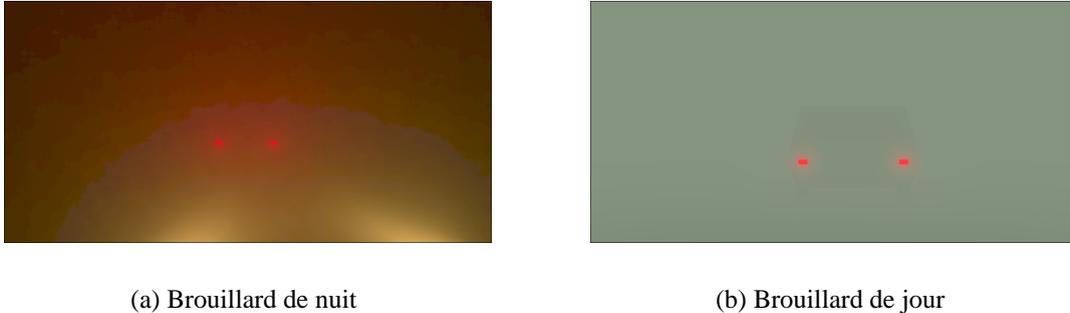


FIG. 6.7 – Simulation des feux anti-brouillard d'un véhicule en brouillard très dense (quelques mètres de visibilité météorologique) à l'aide du modèle étendu des effets visuels du brouillard.

6.2.3.6 Complexité de la description de la scène

Enfin, il faut admettre que l'extension de la loi de Koschmieder pour prendre en compte l'éclairage artificiel diminue considérablement sa simplicité. Il ne suffit plus de connaître la luminance intrinsèque et la distance d'un objet pour en déduire la luminance apparente. Il faut également connaître la contribution de chaque source lumineuse à chaque élément de surface ainsi que la distance entre les deux, ce qui implique une description géométrique et une caractérisation photométrique complexes de la scène. En conditions diurnes, il est possible de revenir à un modèle plus simple en supposant que l'éclairage artificiel est négligeable par rapport à l'éclairage naturel ; la principale amélioration par rapport à la théorie de Koschmieder tient alors dans la prise en compte de l'effet de halo sur les zones primaires du signal visuel.

6.3 Simulation des effets visuels du brouillard par traitement d'images

Malgré sa complexité et, dans certains cas, son imprécision, le modèle photométrique des effets visuels du brouillard proposé dans ce chapitre fournit une alternative intéressante, et parfois inévitable, aux calculs d'illumination globale pour prédire l'impact du brouillard sur l'image de l'environnement visuel d'un automobiliste. En effet, l'approche qui a conduit à sa mise au point est compatible avec une mise en œuvre sous la forme d'une chaîne de traitements d'image.

6.3.1 Données d'entrée du modèle

6.3.1.1 Description $2D^{1/2}$ du signal visuel

Avant tout, il est nécessaire de définir le signal d'entrée auquel vont s'appliquer les traitements destinés à simuler les perturbations engendrées par le brouillard.

On cherche à prédire l'image optique de l'environnement routier qui se forme dans l'œil d'un conducteur, c'est-à-dire la distribution bidimensionnelle de luminance dans son champ visuel, schématisée dans la figure 6.1 en page 120. Le champ visuel est défini par une ouverture horizontale α_h et une ouverture verticale α_v , et forme un cône autour de la direction principale d'observation. Chaque direction est repérée par ses coordonnées angulaires (x, y) relatives à cette direction principale. On échantillonne régulièrement le plan image en $M \times N$ points (ou pixels), chacun desquels correspond à une direction (x_i, y_j) dans laquelle on veut pouvoir calculer la luminance apparente $L(i, j)$, $\forall (i, j) \in [0, M - 1] \times [0, N - 1]$.

Pour ce faire, on veut utiliser le modèle étendu des effets visuels du brouillard présenté dans la section précédente. Il faut donc au minimum connaître la luminance intrinsèque $L_0(i, j)$ provenant de la lumière du ciel, et la profondeur $d(i, j)$ des éléments de la scène pointés par les pixels (i, j) . Cette description « $2D^{1/2}$ » est suffisante lorsque l'éclairage naturel contribue seul à la luminance des surfaces de la scène. Lorsque l'éclairage artificiel doit être pris en compte, comme en situation de conduite de nuit, il est nécessaire de compléter la description du signal visuel en précisant pour chaque source lumineuse la luminance intrinsèque $L_s(i, j)$ qu'elle engendre sans brouillard en chaque pixel, ainsi que la distance $d_s(i, j)$ qui la sépare de l'élément de surface pointé par ce pixel (figure 6.8).

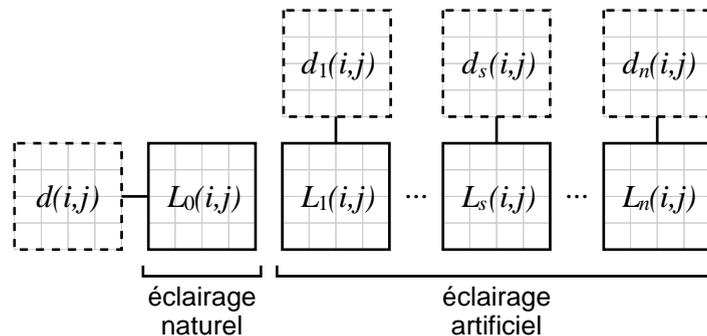


FIG. 6.8 – Description $2D^{1/2}$ du signal visuel (luminance intrinsèque et distance en chaque point), et décomposition en fonction de la source d'éclairage.

Il faut également pouvoir distinguer les pixels primaires et secondaires pour leur appliquer le traitement approprié : filtrage fréquentiel ou atténuation exponentielle. En pratique, on peut utiliser le fait que la source vers la surface de laquelle pointe un pixel primaire est à une distance nulle de cette surface. On peut également envisager de fixer un seuil de luminance intrinsèque au-delà duquel on estime que l'effet de halo doit être pris en compte.

6.3.1.2 Spécification du brouillard

Les effets visuels du brouillard dépendent de sa densité et de sa granulométrie. Il est donc nécessaire de préciser le coefficient d'extinction K , ou de manière équivalente la distance de visibilité météorologique V , ainsi que l'OFC bidimensionnel du brouillard que l'on souhaite simuler. L'OFC fourni doit être compatible avec les caractéristiques du signal visuel auquel on veut l'appliquer, en termes de résolution. Il est impératif, d'une part, que les pixels de la réponse impulsionnelle soient de même taille angulaire que les pixels de l'image. Il est souhaitable, d'autre part, que l'ouverture de la réponse impulsionnelle soit au moins égale au double de l'ouverture du champ visuel, afin d'éviter les effets de bord. Ces contraintes impliquent de prendre en compte la définition et l'ouverture angulaire du signal optique au moment de calculer l'OFC.

Il est également nécessaire de préciser la luminance du brouillard. Il est possible, en première approximation, de la considérer constante dans le champ visuel. Toutefois, il est certainement préférable de prendre en compte la variation horizontale de cette luminance avec l'orientation du regard par rapport au soleil, quantifiée par Paulmier [Pau02].

Il faut enfin spécifier la luminance de voile rétrodiffusée, qui dépend à la fois de la micro-structure du brouillard et des caractéristiques de l'éclairage du véhicule de l'observateur. Il est indispensable de tenir compte de l'hétérogénéité de la rétrodiffusion dans le champ visuel en précisant la distribution bidimensionnelle de cette luminance.

6.3.2 Chaîne de traitements

Les perturbations dues au brouillard peuvent alors être appliquées en trois étapes successives correspondant aux trois effets visuels décrits dans la section 6.1.2 : extinction, halo et voiles.

La première étape consiste à appliquer le double effet d'extinction au niveau des zones secondaires de l'image, selon l'équation 6.6 :

$$L(i, j) = e^{-Kd(i, j)} \left(L_0(i, j) + \sum_{s=1}^n e^{-Kd_s(i, j)} L_s(i, j) \right) \quad (6.9)$$

La deuxième étape consiste à convoluer chaque pixel primaire par la réponse impulsionnelle du brouillard, selon l'équation 6.7. Dans un premier temps, on calcule la distribution de luminance du halo lumineux $h(k, l)$ en prenant la transformée de Fourier inverse de la FTM, elle-même obtenue à partir de l'OFC par l'équation 5.29, et en la pondérant par la luminance intrinsèque de la source s considérée :

$$h(k, l) = L_s(i, j) \mathcal{F}^{-1} \left\{ F^{Kd(i, j)} \right\} (k, l) \quad (6.10)$$

Dans un deuxième temps, on ajoute ce halo au voisinage du pixel traité³ :

$$\forall (a, b) \in \left[-\frac{R}{2}, \frac{R}{2} \right]^2 \quad L(i + a, j + b) += h\left(\frac{R}{2} + a, \frac{R}{2} + b\right) \quad (6.11)$$

3. L'écriture $A += B$, empruntée à la syntaxe du langage de programmation C, signifie qu'on met à jour la valeur de la variable A en lui ajoutant la valeur de la variable B .

où R est la définition retenue pour spécifier l'OFC du brouillard. Dans le cas des sources étendues couvrant plusieurs pixels dans le signal visuel, on peut raisonnablement considérer qu'ils sont sensiblement à la même distance de l'observateur, ce qui permet de ne calculer qu'une seule réponse impulsionnelle par source.

La troisième et dernière étape consiste simplement à ajouter la luminance de voile atmosphérique et la luminance de voile rétrodiffusée³ :

$$L(i, j) += (1 - e^{Kd(i,j)}) L_b(i, j) + L_r(i, j) \quad (6.12)$$

6.3.3 Exemple de mise en œuvre

La chaîne de traitements décrite précédemment a été implémentée afin de démontrer la faisabilité de l'application du modèle photométrique étendu pour simuler les effets visuel du brouillard. Le code de simulation PROF, présenté dans le chapitre 4, a été mis en œuvre afin de produire la description 2D½ détaillée de la scène routière de rase-campagne prise comme exemple. Cette description est présentée en figure 6.9.

Cette scène comprend, outre le terrain traversé par la chaussée à deux voies (avec un marquage de route nationale), deux automobiles et un panneau de signalisation annonçant une intersection (type AB1). Le premier véhicule roule dans le même sens que celui de l'utilisateur dont on simule l'environnement visuel, à une distance de 75 m ; l'autre véhicule vient en sens inverse, à une distance de 100 m ; le panneau est situé en rive, à une distance de 50 m. Seules les sources lumineuses ayant un impact sur l'environnement visuel du conducteur sont prises en compte : ses propres projecteurs en position feux de croisement, les projecteurs du véhicule sur l'autre voie, et les feux à l'arrière du véhicule suivi, le droit étant un feu de position et le gauche un feu anti-brouillard.

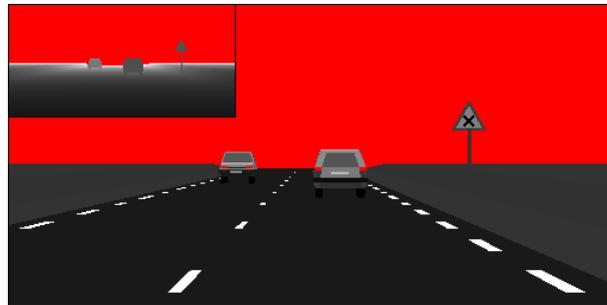
Pour déterminer les informations géométriques, il a suffi de lancer un rayon dans chaque direction (i, j) du champ visuel afin de déterminer la profondeur $d(i, j)$ dans la scène, puis de lancer des rayons secondaires depuis le point d'intersection vers chaque source afin de déterminer sa distance $d_s(i, j)$.

Pour déterminer les informations photométriques, on a fait l'hypothèse que toutes les surfaces étaient lambertiennes et décrites par leur coefficient de réflexion ρ . Il suffit ainsi de profiter du lancer de rayon secondaire précédent pour déterminer l'intensité $I_s(i, j)$ de la source dans la direction du point d'intersection et ainsi calculer la luminance non atténuée en ce point⁴, en utilisant les lois de la photométrie [DeC97] :

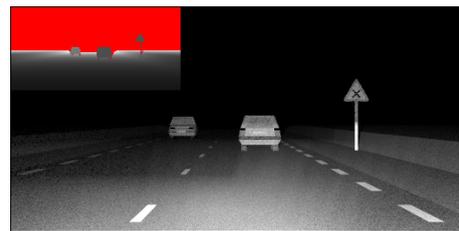
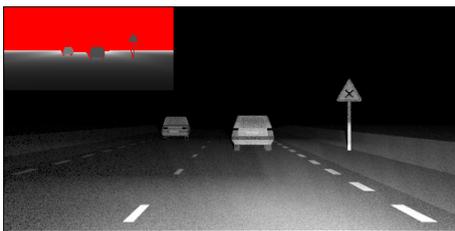
$$L_s(i, j) = \frac{\rho(i, j)I_s(i, j)}{\pi d_s(i, j)^2} \quad (6.13)$$

Dans les directions visant directement la surface d'une source (zones primaires), la luminance a été déterminée à l'aide de l'équation 6.1. Pour calculer la contribution de l'éclairage naturel, on a fait l'hypothèse que la luminance du brouillard L_b était uniforme, et on a utilisé une expression de la luminance intrinsèque adaptée de l'ouvrage de Desvignes [Des97] afin de tenir compte

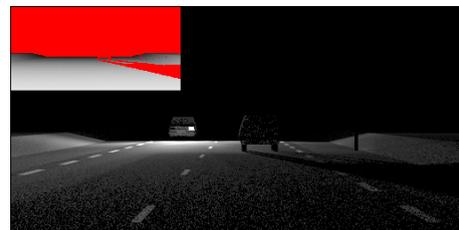
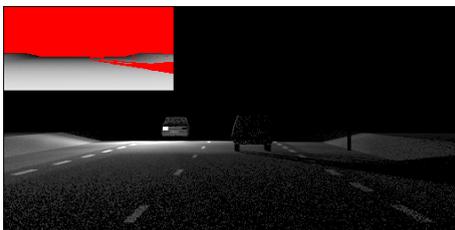
4. En pratique, on a utilisé PROF pour simuler la distribution de luminance provenant de chaque source indépendamment, ce qui explique le bruit dans les images de la figure 6.9.



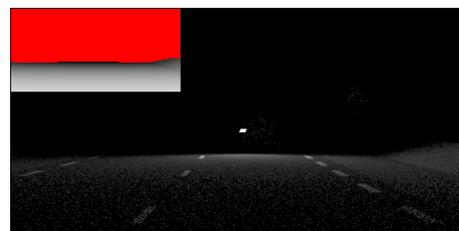
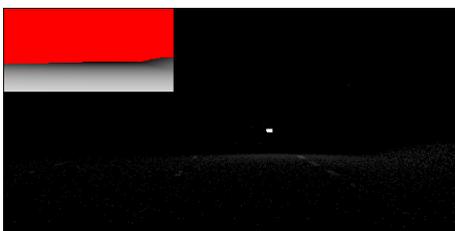
(a) Éclairage naturel.



(b) Éclairage dû aux projecteurs du véhicule de l'observateur.



(c) Éclairage dû aux projecteurs du véhicule croisé.



(d) Éclairage dû aux feux du véhicule suivi.

FIG. 6.9 – Cartes d'iso-luminance et d'iso-distance décrivant l'éclairage dans une scène routière de rase-campagne, selon le principe illustré dans la figure 6.8. La couleur rouge désigne les zones de ciel (distance infinie), et les zones non-éclairées par une source (distance indéfinie).

de l'influence de l'orientation des surfaces par rapport à la verticale sur l'éclairement qu'elles reçoivent du ciel :

$$L_0(i, j) = \rho(i, j) \frac{1 + \cos \theta(i, j)}{2} L_b \quad (6.14)$$

où $\theta(i, j)$ est l'angle de la normale à l'élément de surface pointé par le pixel (i, j) par rapport à la verticale, et $\rho(i, j)$ le coefficient de réflexion de cet élément de surface.

Pour le brouillard, on a choisi une granulométrie centrée autour de $10 \mu\text{m}$ de diamètre dont l'OFC a été calculé dans le chapitre précédent. On a fixé la visibilité météorologique à 100 m. Deux valeurs de la luminance de voile ont été utilisées afin de simuler une situation nocturne ($L_b = 0 \text{ cd.m}^{-2}$) et une situation diurne ($L_b = 500 \text{ cd.m}^{-2}$). Le code de simulation PROF a été une fois de plus mis en œuvre afin de produire la distribution de luminance rétrodiffusée par les codes du véhicule simulé (modèle Peugeot 205).

Disposant de l'ensemble des données nécessaires à la simulation des effets visuels du brouillard, on a calculé les images photométriques de la scène perturbée par la diffusion de la lumière en situations de conduite de nuit et de jour. Les résultats, présentés dans la figure 6.10 sous forme de cartes d'iso-luminance, permettent de visualiser l'importance relative des différents phénomènes qui sont à l'origine des dégradations de la visibilité. Pour la situation diurne, on constate que les effets majeurs du brouillard sont l'extinction et le voile atmosphérique. L'effet de halo reste néanmoins notable, alors que le voile rétrodiffusé est insignifiant. Pour la situation nocturne, la double extinction assombrit fortement la scène, ce qui a pour conséquence de mettre en évidence les halos diffusés autour des sources lumineuses, qui se mélangent avec le voile rétrodiffusé.

6.4 Application à la simulation de conduite par temps de brouillard

6.4.1 Enjeux et contraintes de la simulation de conduite

Le principal intérêt de la simulation des effets du brouillard sur l'environnement visuel de l'utilisateur de la route est de fournir un outil complémentaire de l'expérimentation pour étudier les problèmes perceptifs soulevés par la conduite en conditions de visibilité dégradée [CDC99]. On peut même affirmer qu'il n'existe à ce jour aucune alternative à la simulation de conduite pour qui voudrait aborder les aspects dynamiques du comportement du conducteur confronté à un brouillard dense. En effet, il est quasiment impossible de prévoir le lieu et le moment où les conditions favorables seront réunies pour une expérimentation *in situ*, sans parler du danger auquel on exposerait les sujets en les faisant réellement conduire en situation de visibilité réduite ; quant-aux essais en brouillard artificiel, ils sont forcément limités aux aspects statiques par les dimensions des installations.

Mais simuler la conduite par temps de brouillard implique la capacité de simuler en temps-réel les perturbations du signal visuel causées par le brouillard : extinction, halo et voiles. Il faut en effet minimiser le délai entre les actions du sujet et la mise à jour au niveau de la restitution visuelle, pour ne pas perturber la tâche de conduite. Or la technologie actuelle ne permet pas



(a) Brouillard de nuit



(b) Brouillard de jour

FIG. 6.10 – Cartes d'iso-luminance dans le champ visuel (20° en horizontal) d'un automobiliste en situation de conduite par temps de brouillard (100 m de visibilité météorologique) sur une route de rase-campagne décrite en figure 6.9.

d'envisager à court-terme la possibilité de réaliser en temps-réel des calculs d'illumination globale en milieu diffusant ; néanmoins, les calculateurs graphiques spécialisés sont en constante évolution, offrant régulièrement des optimisations supplémentaires au niveau matériel afin de pouvoir mettre en œuvre les innovations dans le domaine de l'image de synthèse. Des travaux tels que ceux de Lecocq [Lec01] ont montré qu'il était possible d'exploiter ces fonctionnalités pour améliorer la fidélité de la simulation de conduite, et ainsi autoriser son usage en complément de l'expérimentation *in situ*.

6.4.2 Simulation interactive des effets visuels du brouillard

6.4.2.1 La fonction FOG

La génération interactive de l'image d'une scène, quelle qu'elle soit, nécessite la mise en œuvre d'une application appelée « moteur de rendu tridimensionnel ». Cette application utilise un certain nombre de fonctions graphiques permettant d'adresser le système d'affichage, telles que la fonction « FOG », destinée à simuler des effets de perspective aérienne ou de brouillard. La fonction FOG est proposée par la plupart des bibliothèques graphiques, et elle est câblée au niveau matériel sur la plupart des processeurs graphiques.

Le principe de la fonction FOG est décrit dans la documentation d'OpenGL [WNDS99], qui est sans doute la bibliothèque graphique la plus utilisée au niveau des moteurs 3D. Elle agit sur les trois composantes numériques (rouge, verte et bleue) utilisées pour spécifier la couleur de chaque pixel dans l'image, selon la formule suivante :

$$C = t(z)C_0 + (1 - t(z))C_b \quad (6.15)$$

où C est la couleur du pixel à l'affichage, C_0 est la couleur de la partie de la scène pointée par le pixel, C_b est la « couleur du brouillard », et $t(z)$ est l'équivalent d'une transmissivité, variant entre 0 et 1 en fonction de la coordonnée z du point de la scène désigné par le pixel dans un repère centré sur l'observateur virtuel. Le paramètre z est utilisé comme approximation de la profondeur d , comme l'illustre la figure 6.11 ; pour éviter l'erreur induite en périphérie par cette approximation, il est possible de faire appel à la technique mise au point par Heidrich *et al.* [HWSE99], au prix d'une baisse notable des performances en termes de vitesse de rendu.

OpenGL propose le choix entre trois expressions de la transmissivité $t(z)$:

$$t_{\text{lin}}(z) = \frac{z_{\text{max}} - z}{z_{\text{max}} - z_{\text{min}}} \quad (6.16a)$$

$$t_{\text{exp}}(z) = e^{-kz} \quad (6.16b)$$

$$t_{\text{exp2}}(z) = e^{-(kz)^2} \quad (6.16c)$$

Pour le mode linéaire, les paramètres z_{min} et z_{max} permettent de paramétrer respectivement la distance à laquelle la scène commence à être affectée par le brouillard, et la distance à laquelle plus rien n'est visible. Pour les modes exponentiels, le paramètre k permet de contrôler la densité du brouillard. Seul le mode exponentiel simple « exp » est susceptible de correspondre à une

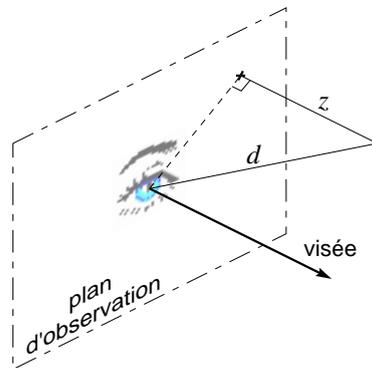


FIG. 6.11 – La fonction OpenGL FOG utilise la coordonnée z comme approximation de la distance d entre un point de la scène et l’observateur.

réalité physique. En effet, en remplaçant l’expression 6.16b dans la formule 6.15, on retrouve une relation comparable à celle de la théorie de Koschmieder (6.4) :

$$C = e^{-kz} C_0 + (1 - e^{-kz}) C_b \quad (6.17)$$

La fonction FOG ne peut donc théoriquement être employée que pour simuler les effets visuels du brouillard en condition diurne, ce qui, on l’a noté, limite fortement le champ d’investigation pour les études de visibilité routière [CDC99].

6.4.2.2 Améliorations proposées

Le modèle des effets visuels du brouillard présenté dans ce chapitre permet d’envisager certaines solutions pour améliorer les outils de simulation de la conduite par temps de brouillard.

Pour les situations de conduite de jour, la fonction FOG peut être utilisée pour simuler les effets d’extinction et de voile atmosphérique dans les zones secondaires de l’image. La convolution des zones primaires serait impossible en temp-réel ; mais il est possible de pré-calculer un certain nombre de halos diffusés pour différentes distances d’observation, et de les afficher au moment du rendu de façon adaptative en fonction de la profondeur en exploitant les nombreuses fonctionnalités optimisées des moteurs 3D en matière de gestion des textures (*multi-texturing*).

Pour les situations de conduite de nuit, la difficulté est accrue par le fait que la fonction FOG n’est plus exploitable directement pour simuler le phénomène d’extinction. Par contre, la simulation des halos peut être réalisée de la même façon que de jour. Il est possible de pré-calculer le voile rétrodiffusé, pour l’ajouter à l’image juste avant l’affichage sous forme de texture avec transparence (*alpha-blending*). On peut également envisager d’utiliser la technique mise au point par Lecocq [Lec01] pour simuler de façon plus réaliste la matérialisation des faisceaux lumineux dans le brouillard.

Ces techniques ont été implémentées dans le cadre d’un projet visant à améliorer les outils

de simulation de conduite en conditions de visibilité dégradée⁵. Les images de la figure 6.12 sont un échantillon des images générées de façon interactive à l'aide des effets spéciaux mis au point [DFG00].



(a) Brouillard de jour.



(b) Brouillard de nuit.

FIG. 6.12 – Simulation visuelle interactive de la conduite par temps de brouillard.

6.5 Conclusion

L'analyse des mécanismes par lesquels le brouillard perturbe les échanges lumineux entre les sources et les surfaces de la scène au sein de laquelle évolue l'utilisateur de la route a montré qu'il était possible de représenter les dégradations du signal visuel induites par ces perturbations sous la forme de trois principaux effets – l'extinction, le halo et les voiles – dont l'importance relative diffère selon les conditions d'éclairage.

Partant de la théorie de Koschmieder, une relation a pu être établie entre la luminance intrinsèque et la luminance apparente des surfaces émissives et réfléchissantes de la scène routière. Un modèle photométrique étendu des effets visuels du brouillard a ainsi pu être proposé, afin de prédire les dégradations subies par le signal visuel de l'utilisateur de la route en présence de brouillard, dans des conditions d'éclairage quelconques (de la nuit noire au plein jour).

La faisabilité de l'implémentation de ce modèle sous la forme d'un chaîne de traitements d'image a été démontrée. Il est possible de simuler les effets visuels du brouillard, au prix d'une description relativement détaillée de la scène observée et de la façon dont elle est éclairée. De telles informations sont disponibles dans des représentations virtuelles de l'environnement routier, ce qui rend possible l'utilisation du modèle pour améliorer la simulation de conduite par temps de brouillard.

5. Projet Prédit VOIR (1999-2002), financé par le Ministère de la Recherche, associant la société Oktal, le LCPC, l'INRETS (CIR et LPC) et le CNRS/CEPA.

Conclusion

Rappel de la problématique

Sur la route, le brouillard est un phénomène perturbant qui occulte les indices visuels utiles à l'automobiliste pour sa tâche de conduite, provoquant ainsi de nombreux accidents. En vue de l'étude du comportement des conducteurs dans le brouillard, il serait intéressant de pouvoir simuler visuellement cette perturbation atmosphérique, en veillant à conserver ses effets psychophysiques.

L'étude des mécanismes de la vision a montré que l'œil fonctionne comme un analyseur fréquentiel spatio-temporel. Les capteurs oculaires reçoivent un éclairage rétinien, qui fournit une information de contraste et de couleur. À partir de ces indices de base, le système visuel infère toutes les autres informations plus complexes, telles que la forme ou la distance. Or il est généralement établi que le brouillard ne possède aucune sélectivité chromatique. On peut donc conclure que la simulation visuelle du brouillard peut se ramener à la modélisation des effets de la multidiffusion de la lumière sur le contraste.

Le brouillard est un phénomène météorologique assez répandu, dû à la présence d'une forte concentration de gouttelettes d'eau en suspension dans l'air. Les paramètres utilisés pour le caractériser sont le mode de formation et le coefficient d'extinction. Mais ils ne donnent aucune information en ce qui concerne sa nature microphysique. Or les théories électromagnétiques de Mie montrent l'influence de la taille des gouttelettes sur la direction de diffusion de la lumière, rendant nécessaire la connaissance de la microstructure (concentration et granulométrie) pour caractériser le brouillard de façon plus significative.

Plusieurs méthodes sont actuellement employées pour modéliser les effets visuels du brouillard. La plus utilisée en images de synthèse est basée sur la loi de Koschmieder. Elle permet d'obtenir des résultats en temps réel pour des situations diurnes, mais réduit le phénomène de diffusion à une simple atténuation. Les techniques de calcul d'illumination globale fournissent des images plus réalistes. Néanmoins, la prise en compte de la granulométrie du brouillard implique des volumes de calcul incompatibles avec une visualisation interactive. Plus récemment, une approche différente a été étudiée, fondée sur la théorie du signal. Le brouillard est assimilé à un filtre, décrit par sa fonction de transfert de modulation (FTM), qui modifie le contraste en fonction des fréquences spatiales. Cette approche est bien adaptée au mode de fonctionnement de la vision, par analyse fréquentielle du contraste. Elle n'a pas encore été appliquée à la synthèse d'images, à notre connaissance.

Le travail de thèse a consisté à approfondir l'utilisation de la FTM pour modéliser les effets

visuels du brouillard. Ce travail s'est appuyé sur un code de simulation physiquement réaliste de la propagation de la lumière par diffusion multiple. La FTM est calculée par analyse de Fourier des résultats simulés. Ce code a permis de définir un opérateur de contraste pour caractériser le brouillard, puis d'en explorer les propriétés afin de définir un champ d'utilisation. On a alors mis au point des algorithmes utilisant cet opérateur pour traiter des images en vue de simuler des scènes de conduite dans le brouillard. L'objectif était de pouvoir à terme intégrer ces résultats dans un simulateur de conduite, afin d'étudier le comportement des automobilistes dans de mauvaises conditions de visibilité.

Travail réalisé

Dans notre approche, une épaisseur donnée de brouillard est considérée comme un filtre linéaire, qu'on cherche à caractériser par sa FTM. Une étude de faisabilité de cette approche a apporté deux résultats importants :

- un seul paramètre tel que la distance de visibilité météorologique ne suffit pas pour décrire les effets du brouillard sur le contraste ;
- plus les particules composant le brouillard ont un diamètre important, moins l'atténuation du contraste est uniforme en fonction des fréquences spatiales, en raison de l'apport croissant de la lumière diffusée (halo) par rapport à la lumière transmise.

Le code de tracé de photons purement Monte Carlo utilisé au départ pour simuler la transmission d'une image à travers une tranche de brouillard ne permettait pas de modéliser des détecteurs réalistes (œil ou caméra). On a donc été amené à mettre en œuvre une technique plus performante, de type semi-Monte-Carlo, permettant de générer un signal visuel sous la forme d'une distribution de luminances. Après avoir vérifié la validité physique des résultats produits par le nouveau code de simulation, on a repris l'étude du filtrage du contraste par le brouillard. On a ainsi pu établir que la FTM du brouillard est une fonction décroissante, et dépendante de la microstructure.

La FTM dépend d'un certain nombre de paramètres liés au brouillard (épaisseur, concentration, granulométrie) et au signal lumineux (ouverture du cône d'émission) utilisé pour former la réponse impulsionnelle. Tous ces paramètres étant ainsi susceptibles de modifier le filtrage fréquentiel du contraste, on a procédé à des simulations en vue d'une étude systématique de leurs influences individuelles ou conjuguées sur la FTM. Pour résoudre le problème du bruit dans les résultats de simulation pour les fortes densités de brouillard, on a mis au point une procédure spécialement adaptée pour l'acquisition de la réponse impulsionnelle du brouillard, exploitant sa symétrie de révolution. L'analyse des résultats nous a notamment permis de mettre en évidence une propriété intéressante : il est possible, par une relation simple, de généraliser la FTM d'une tranche donnée de brouillard à des tranches de brouillard de densité optique différente tant que la microstructure reste constante. Cette propriété nous a amené à définir l'Opérateur Fréquentiel de Contraste, égal à la FTM pour une densité optique unitaire. L'OFC complète le coefficient d'extinction (et donc la visibilité météorologique) pour décrire les effets du brouillard sur le contraste.

On s'est ensuite attaché à analyser les mécanismes conduisant à la modification du signal visuel par le brouillard en situation de conduite. Trois effets visuels majeurs ont ainsi été identifiés :

- l'extinction, qui atténue la luminance des surfaces réfléchissantes (zones secondaires de l'image),
- les halos, formés par la diffusion autour des sources lumineuses (zones primaires),
- les voiles générés par la diffusion de la lumière du ciel et la rétrodiffusion de la lumière des phares.

Un modèle photométrique de ces effets a alors été proposé, basé sur la théorie de Koschmieder, et permettant de prédire la luminance apparente dans le brouillard en fonction de la luminance intrinsèque. Une chaîne de traitements $2D\frac{1}{2}$ (fonction de la profondeur) destinée à appliquer ce modèle a été mise au point. La luminance des zones secondaires est atténuée exponentiellement en fonction de la distance, selon la loi de Beer-Lambert : une première fois pour la transmission de la lumière entre les sources contributrices et la surface réfléchissante, et une deuxième fois entre cette surface et l'observateur, en tenant compte de l'apport de la luminance ambiante, selon la loi de Koschmieder ; les halos sont simulés en répartissant la luminance des zones primaires sur les pixels voisins par convolution avec la FTM de la tranche de brouillard entre l'observateur et la source lumineuse, calculée en chaque point à partir de l'OFC ; enfin, la rétrodiffusion de la lumière des phares est traitée par l'ajout d'une distribution de luminance pré-calculée.

La faisabilité de la mise en œuvre de la méthode proposée sur simulateur de conduite a été vérifiée dans le cadre du projet VOIR, financé par le Ministère de la Recherche dans le cadre du Programme National de Recherche et d'Innovation dans les Transports terrestres [VOI02]. L'objectif de ce projet, qui associait la société Oktal, le LCPC, l'INRETS (CIR et LPC) et le CNRS/CEPA, était d'améliorer les outils de simulation de conduite en conditions de visibilité dégradée.

Perspectives

L'étude du filtrage fréquentiel du contraste dans le brouillard par la simulation a été menée en parallèle de façon expérimentale au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers, qui a développé un système permettant de mesurer *in situ* la réponse impulsionnelle du brouillard [Dum01]. On envisage d'utiliser ce système pour recueillir l'OFC en milieu naturel, afin d'étayer les résultats obtenus par simulation.

On envisage également d'étudier l'effet de voile rétrodiffusé de façon plus approfondie, en analysant l'influence de la géométrie des projecteurs du véhicule et l'importance du phénomène de diffusion multiple. Il sera intéressant, dans le cadre de cette étude, de comparer la technique de simulation présentée ici avec la technique développée par Lecocq [Lec01], qui semble plus satisfaisante pour prendre en compte l'éclairage automobile.

En outre, on envisage d'étudier une solution permettant de prendre en compte les hétérogénéités spatiales du brouillard, notamment celle – particulièrement accidentogène – que rencontre un conducteur lors du passage d'une zone sans brouillard à une zone de brouillard dense. Le

manque de données expérimentales sur les variations spatiales de la densité du brouillard risque toutefois de limiter les possibilités de mise en œuvre de cette solution.

Enfin, on envisage d'utiliser le modèle étendu des effets visuels du brouillard proposé ici pour évaluer l'impact du brouillard sur la performance de l'infrastructure en termes de visibilité. Cette étude pourra être menée de façon théorique, tout d'abord, en croisant le modèle photométrique des effets du brouillard avec les modèles de vision utilisés pour spécifier les caractéristiques de la signalisation. Cette phase préliminaire pourra être étayée par des expérimentations avec observateurs en conditions statiques, dans un premier temps (sur des images de synthèse produites avec la chaîne de traitement d'images présentée ici), puis en conditions dynamiques afin de prendre en compte la charge mentale induite par la tâche de conduite dans différentes conditions de circulation (sur simulateur de conduite). Ce travail permettra de proposer des solutions de signalisation et d'aménagement permettant d'impliquer l'infrastructure dans la sécurité des usagers par temps de brouillard.

Bibliographie

- [AFE91] Association Française de l'Éclairage. « *La photométrie en éclairage* », 1991. Société d'Éditions LUX, Paris.
- [Arv86] James ARVO. « Backward Ray Tracing ». Dans *Developments in Ray Tracing, SIGGRAPH '86 Course Notes*, volume 12, août 1986.
- [Arv93] James ARVO. « Transfer Equations in Global Illumination ». Dans *Global Illumination, SIGGRAPH '93 Course Notes*, volume 42, août 1993.
- [ATI97] Yoshiro AOKI, Tetsuo TANIGUCHI, et Takashi IRIKURA. « Computer graphical simulation of light signal system including light scattering by atmospheric particles ». *J. Light & Vis. Env.*, 21(2), 1997.
- [AW97] M. ASTON et T. WILLIAMS. « Research into effective performance of variable message signs (VMS) in adverse weather conditions ». Report prepared for the Highways Agency Sira Reference A/9814/00, Sira Ltd, Electro-optics Division, Chislehurst (UK), February 1997.
- [BBD⁺95] B. BEN DOR, P. BRUSCAGLIONI, A. DEVIR, P. DONELLI, et A. ISMAELLI. « Cloud, fog and aerosol effect on the MTF of optical systems ». Dans *SPIE Vol.2580*, pages 106–114, 1995.
- [BD98] Christoph BUSCH et Eric DEBES. « Wavelet transform for analyzing fog visibility ». *IEEE Intelligent System*, 13(6):66–71, 1998.
- [BDIZ93] P. BRUSCAGLIONI, P. DONELLI, A. ISMAELLI, et G. ZACCANTI. « Monte-Carlo calculations of the modulation transfer function of an optical system operating in a turbid medium ». *Applied Optics*, 32(15):2813–2824, May 1993.
- [Bel98] M. S. BELEN'KII. « Effect of the inner scale of turbulence on the atmospheric modulation transfer function ». *Georgia Tech Research Institute Journal of Technology*, 1(1), 1998.
- [Bes69] Jean BESSEMOULIN. *Atlas climatique de la France*. Ministère des Transports, Secrétariat Général à l'Aviation Civile, Direction de la Météorologie Nationale, Paris, 1969.
- [BH96] Corinne BRUSQUE et Roger HUBERT. « La métrologie de la luminance par caméra CCD - Étalonnage et qualification du système Mélusine ». *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 205, Sep.-Oct. 1996. Réf.4064.
- [Bis94] Luc R. BISSONNETTE. « Imaging through the atmosphere: practical instrumentation-based theory and verification of aerosol modulation transfer function: comment ». *J. Opt. Soc. Am. A*, 11(3):1175–1179, 1994.

- [Bla81] P. BLAISE. « Vision de la signalisation en atmosphère perturbée ». Rapport préliminaire (ct1.6), Commission Internationale de l'Éclairage, Mars 1981.
- [Bla85] P. BLAISE. « Influence de la diffusion de Rayleigh sur la vision des couleurs ». *Annales des Ponts & Chaussées*, 1er trimestre 1985.
- [BMGG92] Jean-Philippe BRITON, Bruno MAHEU, Gérard GRÉHAN, et Gérard GOUESBET. « Monte Carlo simulation of multiple scattering in arbitrary 3-D geometry ». *Part. Part. Syst. Charact.*, 9:52–58, 1992.
- [Bon80] C. BONNET. « Le traitement des formes dans le système visuel ». *LUX France*, 110:17–22, décembre 1980.
- [BR93] F. BRESCIANI et G. ROSSI. « A computational method to simulate light propagation in fog: theory, experimental verification and applicability to road lighting systems analysis ». Dans *Proceedings of Lux Europa 1993*, volume 2, Edinburgh, Scotland, 1993.
- [Bra95] Ronald N. BRACEWELL. *Two-dimensional imaging*. Prentice Hall signal processing series. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- [BRBD96] A. BIERMAN, J. RAFFUCCI, P. R. BOYCE, et C. DECUSATIS. « Exit-sign image degradation in smoke: a quantitative simulation ». *Lighting Res. Technol.*, 28(4):177–188, 1996.
- [Bri89] Jean-Philippe BRITON. « Simulations numériques de la diffusion multiple de la lumière par une méthode de Monte Carlo et applications ». Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de l'Université de Rouen, 1989.
- [Bro83] I. D. BROWN. « Driving in fog ». *Report of the "Eyes on the road" symposium*, pages 26–27, November 1983.
- [BSS93] P. BLASI, B. Le SAËC, et C. SCHLICK. « A rendering algorithm for discrete volume density objects ». *Computer Graphics Forum (Proc. EuroGraphics '93)*, 12(3):201–210, 1993.
- [BSS94] P. BLASI, B. Le SAËC, et C. SCHLICK. « An importance driven Monte-Carlo solution to the global illumination problem ». Dans *5th EuroGraphics Workshop on Rendering*, pages 173–183, 1994.
- [BT92] N. BHATE et A. TOKUTA. « Photorealistic volume rendering of media with directional scattering ». Dans *3rd Eurographics Workshop on Rendering*, pages 227–245, 1992.
- [BVMC83] C. BOURDY, F. VIÉNOT, A. MONOT, et A. CHIRON. « The human visual system under selective chromatic adaptation: shape of the contrast sensitivity curves, foveal versus peripheral vision ». *Journal of Optics*, 14(5):225–233, 1983.
- [BY95] Glenn D. BOREMAN et Sidney YANG. « Modulation transfer function measurement using three- and four-bar targets ». *Applied Optics (Engineering & Laboratory Notes)*, pages 8050–8052, December 1995.
- [CC75] L. L. CARTER et E. D. CASHWELL. « Particle-transport simulation with the Monte Carlo method ». Technical report TID-26607, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 1975.

- [CDC99] Viola CAVALLO, Jocelyne DORÉ, et Michèle COLOMB. « Simulation de la conduite automobile : étude de problèmes perceptifs de la conduite dans le brouillard ». Rapport sur convention DRAST 96 MT 24, Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, mai 1999.
- [CDCL97] Viola CAVALLO, Jocelyne DORÉ, Michèle COLOMB, et Gilles LEGOUEIX. « Évaluation des distances dans le brouillard par l'usager de la route ». Rapport sur convention DRAST 95 MT 0009, Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, février 1997.
- [CDG02] Viola CAVALLO, Eric DUMONT, et Gilles GALLÉE. « Experimental validation of extended fog simulation techniques ». Dans KEMENY et GAURIAT, éditeurs, *Proc. of DSC2002 (7th international Driving Simulation Conference, Paris, France, September 11-13 2002)*, pages 329–340, 2002.
- [Chi92] Charles K. CHIU, éditeur. *Wavelets: a tutorial in theory and applications*, volume 2 de *Wavelet analysis and its applications*. Academic Press, Inc, San Diego, CA, 1992.
- [CIE87] « Vocabulaire international de l'éclairage ». Commission Internationale de l'Éclairage. Publication No. 17.4, 1987.
- [CIE92] « Vision de la signalisation en atmosphère perturbée ». Commission Internationale de l'Éclairage. Rapport préliminaire (CT1.6), Juin 1992.
- [CIE96] « Spatial distribution of daylight - CIE standard overcast sky and clear sky ». Commission Internationale de l'Éclairage. Publication No. S003/E, 1996.
- [CPC84] Robert L. COOK, Thomas PORTER, et Loren CARPENTER. « Distributed ray tracing ». *Computer Graphics (Proc. Siggraph '84)*, 18(3):137–145, July 1984.
- [CS92] W. M CORNETTE et J. G. SHANKS. « Physically reasonable analytic expression for the single-scattering phase function ». *Applied Optics*, 31(16):3152–3160, 1992.
- [DDL] T. DANIEL, J. S. DUBUISSON, et S. LEBRAS. « Estimation of visibility of atmosphere using CCD captor and image processing ». TETRIMA project.
- [DeC97] C. DECUSATIS, éditeur. *Handbook of applied photometry*. AIP Press, Woodbury, NY, 1997.
- [Dei69] D. DEIRMENDJIAN. *Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions*. American Elsevier, New York, 1969.
- [Des37] René DESCARTES. *Discours de la méthode*. Corpus des œuvres de philosophie en langue française. Éditions Fayard, Paris, 1987 (1637).
- [Des97] François DESVIGNES. « Rayonnements optiques - Radiométrie, photométrie », Chapitre 4, pages 72–90. Enseignement de la physique. Masson, Paris, 2ème édition, 1997.
- [DFG00] Eric DUMONT, Emmanuel FOLLIN, et Gilles GALLÉE. « Improved fog rendering for driving simulation ». Dans KEMENY et GAURIAT, éditeurs, *Proc. of DSC2000 (5th international Driving Simulation Conference, Paris, France, September 6-8 2000)*, pages 193–201, 2000.

- [DJC95] L. Da DALTO, J. P. JESSEL, et R. CAUBET. « La représentation de milieux participants en images de synthèse ». Dans *Actes des Troisièmes journées de l'AFIG*, 1995.
- [DK81] A. S. DROFA et I. L. KATSEV. « Certain problems of seeing through clouds and fogs ». *Meteorologiya i Gidrologiya*, 11:101–109, 1981.
- [DLW93] P. DUTRÉ, E. LAFORTUNE, et Y. D. WILLEMS. « Monte Carlo light tracing with direct computation of pixel intensities ». Dans *Compugraphics '93 proceedings*, 1993.
- [Dor98] Péter DORNBACH. « Implementation of bidirectional ray tracing algorithm ». Dans *CESCG '98 proceedings*, 1998.
- [Dro90] A. S. DROFA. « Visibility of objects in a turbid atmosphere ». *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 26(6):448–452, 1990.
- [DSK98] Itai DROR, Arnon SANDROV, et N. S. KOPEIKA. « Experimental investigation of the influence of the relative position of the scattering layer on image quality: the shower curtain effect ». *Applied Optics*, 37(27):6495–6499, September 1998.
- [Dum01] Eric DUMONT. « Approche physique de la perception de la route dans le brouillard ». Rapport final du thème de recherche ESR03, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 2001.
- [DV88] E. A. DEYOE et D. C. VANESSEN. « Concurrent processing streams in monkey visual cortex ». *Trends in Neuro-Sciences*, 11(5):219–226, 1988.
- [DWT⁺94] B. T. DAVIS, A. E. WETMORE, D. H. TOFSTED, R. C. SHIRKEY, R. A. SUTHERLAND, et M. A. SEAGRAVES. « EOSAEL Aerosol phase function database (PFNDAT) ». Draft, U.S. Army Research Lab, April 1994.
- [Fou00] Fabrice FOURNELA. « Mesure de MFTO - Atténuation des contrastes dans le brouillard ». CRT 16961299, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers, avril 2000.
- [GA97] Louis GAUDART et Maurice ALBET. *Physique photographique*. Le Temps Appri-voisé, Paris, 1997.
- [GB92] D. GUÉDALIA et T. BERGOT. « Premiers résultats de la campagne «Lille 88» d'étude du brouillard ». *La Météorologie*, 42:11–20, 1992.
- [Gla95] Andrew S. GLASSNER. *Principles of Digital Image Synthesis*. Morgan Kaufmann Pub., San Francisco, CA, 1995.
- [GM92] Jianhong GUAN et Jean-Marc MEUSBURGER. « Visibilité météorologique par caméra N/B ». SMIRO N°2, Météo France, Septembre 1992.
- [GVP97] M. GAZZI, V. VICENTINI, et C. PESCI. « Dependence of black target's apparent luminance on fog droplet size distribution ». *Atmospheric Environment*, 31(20):3441–3447, August 1997.
- [HG41] L. C. HENYEVY et J. L. GREENSTEIN. « Diffuse radiation in the galaxy ». *Astrophysical Journal*, 93:70–83, 1941.
- [HH64] J. M. HAMMERSLEY et D. C. HANDSCOMB. *Monte Carlo methods*. Methuen's monographs on applied probability and statistics. Methuen & Co, London, 1964.

- [Hul81] Hendrik C. VAN DE HULST. *Scattering by Small Particles*. Structure of matter. Dover, New York, 1981.
- [Hus76] Rudolf B. HUSAR. « Physics and chemistry of atmospheric aerosols ». A course given at the University of Stockholm (Department of Meteorology), fall semester 1976.
- [HWSE99] Wolfgang HEIDRICH, Rudiger WESTERMANN, Hans-Peter SEIDEL, et Thomas ERTL. « Applications of pixel textures in visualization and realistic image synthesis ». Dans *Symposium on Interactive 3D Graphics*, pages 127–134, 1999.
- [Jaf95] Jules S. JAFFE. « Monte Carlo modeling of underwater-image formation: validity of the linear and small angle approximations ». *Applied Optics*, 34(24):5413–5421, August 1995.
- [JC98] Henrik Wann JENSEN et Per H. CHRISTENSEN. « Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps ». Dans *Proc. SIGGRAPH '98*, pages 311–320, 1998.
- [Jen96] Henrik Wann JENSEN. « Global illumination using photon maps ». Dans *7th EuroGraphics Workshop on Rendering Techniques*, pages 21–30, 1996.
- [Joh78] D. JOHNSON. « Visibility modeling for a landing simulator with special reference to low visibility ». *AGARD Conference Proceedings*, 249(9), 1978.
- [Kaj86] J. KAJIYA. « The Rendering Equation ». *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '86)*, 20(4):143–150, 1986.
- [Kel94] D. H. KELLY. *Visual Science and Engineering: Models and Applications*. Marcel Dekker, New York, 1994.
- [KFN00] Helga KOLB, Eduardo FERNANDEZ, et Ralph NELSON. « WEBVISION - The organization of the retina and visual system ». <http://webvision.med.utah.edu>, December 2000.
- [KI85] Yasuo KUGA et Akira ISHIMARU. « Modulation transfer function and image transmission through randomly distributed spherical particles ». *J. Opt. Soc. Am. A*, 2(12):2330–2335, December 1985.
- [Kok99] Alex A. KOKHANOVSKY. *Optics of Light Scattering Media - Problems and Solutions*. John Wiley & Sons, 1999.
- [Kon97] Christos KONTOGEORGAKIS. « Millimeter through visible frequency waves through aerosols - Particle modeling, reflectivity and attenuation ». Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1997.
- [KONN91] Kazufumi KANEDA, Takashi OKAMOTO, Eihasiro NAKAMAE, et Tomoyuki NISHITA. « Photorealistic image synthesis for outdoor scenery under various atmospheric conditions ». *The Visual Computer*, 7(5):247–258, September 1991.
- [KZ94] I. L. KATSEV et E. P. ZEGER. « The modern theory of black object visibility and meteorological visibility range ». *Atmospheric Environment*, 28(5):763–767, 1994.
- [Lac83] Jean-Louis LACOUME. *Théorie du signal*. Que sais-je? Presses Universitaires de France, Paris, 1983.

- [Laf96] Eric LAFORTUNE. « *Mathematical models and Monte Carlo algorithms for physically based rendering* ». PhD thesis, Katholieke Universiteit Leuven, February 1996.
- [Lan94] Éric LANGUÉNOU. « *Radiosité hiérarchique et transfert radiatif dans les milieux semi-transparents* ». Thèse de doctorat, Université de Rennes 1 (Institut de Formation Supérieure en Informatique et Communication), 1994.
- [LB94] J. R. LINSKENS et C. F. BOHREN. « Appearance of the sun and the moon seen through clouds ». *Applied Optics*, 33(21):4733–4740, July 1994.
- [Lec01] Pascal LECOCQ. « *Simulation d'éclairage temps réel par des sources lumineuses mobiles et statiques : outils pour la simulation de conduite* ». Thèse de doctorat, Université de Marne la Vallée, 2001.
- [LeG56] Y. LE GRAND. *Optique physiologique - L'espace visuel*, volume troisième. Éditions de la « revue d'optique », Paris, 1956.
- [LeG65] Y. LE GRAND. *Optique physiologique - La dioptrie de l'œil et sa correction*, volume premier. Éditions de la « revue d'optique », Paris, troisième édition, 1965.
- [LeG72] Y. LE GRAND. *Optique physiologique - Lumière et couleurs*, volume II. Masson & Cie, Paris, deuxième édition, 1972.
- [LPS98] Bernard LAPEYRE, Étienne PARDOUX, et Rémi SENTIS. *Méthodes de Monte-Carlo pour les équations de transport et de diffusion*. Mathématiques & Applications. Springer, 1998.
- [Luc98] Robert L. LUCKE. « Deriving the Coltman correction for transforming the bar transfer function to the optical transfer function (or the contrast transfer function to the modulation transfer function) ». *Applied Optics*, 37(31):7248–7252, November 1998.
- [Lut78] Richarf F. LUTOMIRSKI. « Atmospheric degradation of electrooptical system performance ». *Applied Optics*, 17(24):3915–3921, December 1978.
- [LW96] Eric P. LAFORTUNE et Yves D. WILLEMS. « Rendering participating media with bidirectional path tracing ». Dans *7th Eurographics Workshop on Rendering*, pages 92–101, June 1996.
- [Max94] N. L. MAX. « Efficient light propagation for multiple anisotropic volume scattering ». Dans *5th Eurographics Workshop on Rendering*, pages 87–104, 1994.
- [Max95] Nelson MAX. « Optical models for direct volume rendering ». *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1(2):99–108, June 1995.
- [MBP86] J. P. MENU, D. BATEJAT, et S. PRADELLA. « Évolution de la sensibilité au contraste en couleurs chez l'homme avec l'excentricité de présentation ». Rapport final CERMA 86-25 (LCBA), Centre d'Études et Recherches en Médecine Aérospatiale, France, Juillet 1986.
- [MD91] J. P. MENU et F. DUFOREZ. « Le stimulus visuel en conduite automobile ». *Bulletin de la Société Française d'Optique Physiologique*, 1(1):63–64, 1991.
- [Mid52] W. E. K. MIDDLETON. *Vision through the atmosphere*. University of Toronto, Canada, 1952.

- [MN84] S. P. MCKEE et K. NAKAYAMA. « The detection of motion in the the peripheral visual field ». *Vision Research*, 24(1):25–32, 1984.
- [MNSS78] J. O. MERRITT, R. E. NEWTON, G. A. SANDERSON, et M. L. SELTZER. « Visibility quality: an electro-optical meter for in-vehicule measurement of modulation transfer (MTF) ». Technical report, Human Factors Research Inc, CA, April 1978.
- [Mon92] A. MONOT. « Traitement de l’information spatiale et temporelle ». Support de cours (Université Paris-Sud XI, France), 1992.
- [Nam92] N. NAMEDA. « Fog modulation transfer function and signal lighting ». *Lighting Research & Technology*, 24(2):103–106, 1992.
- [NDN96] T. NISHITA, Y. DOBASHI, et E. NAKAMAE. « Display of clouds taking into account multiple anisotropic scattering and skylight ». Dans *Proc. SIGGRAPH ‘96*, pages 379–386, 1996.
- [NFP98] « Météorologie routière - Recueil des données météorologiques et routières - Terminologie ». AFNOR (Paris La Défense). NF P 99-320, avril 1998.
- [NN95] László NEUMANN et Attila NEUMANN. « Radiosity and hybrid methods ». *ACM Transactions on Graphics*, 14(3):233–265, July 1995.
- [ONI01] « Grands thèmes de la sécurité routière - Conditions climatiques - Brouillard ». Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière. Note de synthèse, 2001.
- [PA84] J. L. PAUMIER et M. ARNAL. « Visibilité par temps de brouillard ». Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand, Août 1984.
- [Pau93] Giselle PAULMIER. « Formation et caractéristiques microphysiques des brouillards naturels ». CRT 261162, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1993.
- [Pau02] Giselle PAULMIER. « Fog luminance evaluation in daytime ». Dans *Proc. of the 16th Biennial Symposium on Visibility and Simulation*. TRB, 2002.
- [PC98] Giselle PAULMIER et Victor CARTA. « Monte Carlo simulation of photometrical measurements in fog ». Dans H. NIEDERREITER et J. SPANIER, éditeurs, *Monte Carlo and quasi-Monte Carlo Methods 1998*. Springer, 1998.
- [PCG⁺96] G. PAULMIER, V. CARTA, T. GIRASOLE, B. MAHEU, et C. ROZÉ. « Un outil de simulation pour les études de visibilité dans le brouillard ». *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 205:25–38, 1996.
- [PGMR98] Bernard PÉROCHE, Djamchid GHAZANFARPOUR, Dominique MICHELUCCI, et Marc ROELENS. *Informatique graphique*. Éditions Hermès, Paris, 1998.
- [PPS97] Frederic PÉREZ, Xavier PUEYO, et François-Xavier SILLION. « Global illumination techniques for the simulation of participating media ». Dans *8th Eurographics Workshop on Rendering*, pages 309–320, June 1997.
- [PTVF92] William H. PRESS, Saul A. TEUKOLSKY, William T. VETTERLING, et Brian P. FLANNERY, éditeurs. « *Numerical recipes in C (The art of scientific computing)* », Chapitre 12, pages 496–536. Cambridge University Press, 2ème édition, 1992.
- [PV80] Lewis J. PINSON et Georges S. VIGUET III. « Automatic testing of performance of an electro-optical imaging system under obscured atmospheric conditions ». Dans *SPIE Vol.255 Practical Electro-Optical Instruments and Techniques*, 1980.

- [Ric] Jacques RICARD. « Éléments d'étude des projecteurs antibrouillard ». Laboratoire d'Optique de Cibié Projecteurs.
- [Ros75] H. ROSS. « Mist, murk and visual perception ». *New Scientist*, pages 658–660, June 1975.
- [Ros01] Ernst-Olaf ROSENHAHN. « Adaptive headlamp systems concerning adverse weather: fog ». Dans Prof. Dr.-Ing. H. J. SCHMIDT-CLAUSEN, éditeur, *Progress in automobile lighting (PAL '01)*, volume 2 de *Darmstädter Lichttechnik*, pages 827–828. Herbert Utz Verlag, München, 2001.
- [RT87] H. E. RUSHMEIER et E. TORRANCE. « The zonal method for calculating light intensities in the presence of a participating medium ». *Computer Graphics*, 21(4):293–302, July 1987.
- [Rus97] Szymon RUSINKIEWICZ. « A survey of BRDF representation for computer graphics ». Project for CS348c, Princeton University, NJ, 1997.
- [Sch92] Christophe SCHLICK. « *Divers éléments pour une synthèse d'images réalistes* ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, novembre 1992.
- [SDZ00] Zi-qin SANG, Ming-yue DING, et Tian-xu ZHANG. « Imaging for outdoor scene in rain and fog ». *Acta Electronica Sinica*, 28(3):131–133, March 2000.
- [SF79] Eric P. SHETTLE et Robert W. FENN. « Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties ». AFGL-TR 79-0214, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base, MA, 1979.
- [SGT00] Roman STEMPROK, Bobby GREEN, et Zhen TANG. « Measurement of visibility with CCD-devices ». Dans *Proc. CIE Division 4 and 5 Meeting*, pages 1–31, September 2000.
- [Shi77] D. SHINAR. « Driver visual limitations diagnosis and treatment ». Technical report DOT HS 5-1275, National Technical Information Service, VA, May 1977.
- [Shi94] Peter SHIRLEY. « Hybrid Radiosity/Monte Carlo methods ». Dans *Advanced radiosity, SIGGRAPH '94 Course Notes*, 1994.
- [SK93] D. SADOT et N. S. KOPEIKA. « Imaging through the atmosphere: practical instrumentation-based theory and verification of aerosol MTF ». *J. Opt. Soc. Am. A*, 10(1):172–179, January 1993.
- [SK94] D. SADOT et N. S. KOPEIKA. « Effects of absorption on image quality through a particulate medium ». *Applied Optics*, 33(30):7107–7111, October 1994.
- [SK98] László SZIRMAY-KALOS. « Stochastic methods in global illumination ». State of the art report TR-186-2-98-23, Technical University of Budapest, August 1998.
- [SKR95] D. SADOT, N. S. KOPEIKA, et S. R. ROTMAN. « Incorporation of atmospheric blurring effects in target acquisition modeling of thermal images ». *Infrared Phys. Technol.*, 26(2):551–564, 1995.
- [Smi97] Steven W. SMITH. *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. California Technical Publishing, San Diego, CA, 2ème édition, 1997.
- [SP94] François X. SILLION et Claude PUECH. *Radiosity and global illumination*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc, San Francisco, CA, 1994.

- [Sér97] Laurent SÉRÉZAT. « *Contribution à la qualification des salles de brouillard comme outils pour l'évaluation de la visibilité de la signalisation routière* ». Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, 1997.
- [SSR98] Robert J. SNOWDEN, Nicola STIMPSON, et Roy A. RUDDLE. « Speed perception fogs up as visibility drops ». *Nature*, 392(6675):450, April 1998.
- [ST92] L. S. STONE et P. THOMPSON. « Effect of contrast on human speed perception ». Technical memorandum 103989, National Aeronautics & Space Administration, December 1992.
- [TL75] Robert E. TURNER et Peter F. LAMBECK. « Natural and artificial illumination in optically thick atmospheres ». Final report 108300-4-F, Environment Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, 1975.
- [VDK90] L. P. VOLNISTOVA, A. S. DROFA, et I. O. KURBANOV. « Experimental study of object visibility in fog ». *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 26(7):524–529, 1990.
- [VDS85] L. P. VOLNISTOVA, A. S. DROFA, et V. P. SNYKOV. « Effect of the microstructure of fog on the quality of an optical image observed through it ». *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 21(5):390–393, 1985.
- [Vea97] Eric VEACH. « *Robust Monte Carlo methods for light transport simulation* ». PhD thesis, Stanford University, December 1997.
- [Ver89] Marie-France VERHAEGHE. « Anatomie et physiologie de la voie visuelle ». *Traité d'optique physiologique*, Juillet 1989.
- [VG95] Eric VEACH et Leonidas J. GUIBAS. « Optimally combining sampling techniques for Monte Carlo rendering ». *Computer Graphics*, 29:419–428, August 1995.
- [VOI02] « Visualisation optimisée de l'infrastructure routière ». Rapport final du projet VOIR (PREDIT 2, Ministère de la Recherche), mai 2002.
- [Wal92] Philip L. WALKER. « Aerosol induced loss of image resolution ». Dans *SPIE Vol.1688 Atmospheric propagation and remote sensing*, pages 37–46, 1992.
- [Wel69] Willard H. WELLS. « Loss of image resolution in water as a result of multiple small-angle scattering ». *Journal of the Optical Society of America*, 59(6):686–691, June 1969.
- [Whi93] Drew WHITEHOUSE. « A discrete solution of the scattering equation for computer graphics ». ANUSF TR 93-01, Australian National University, Supercomputer Facility, Canberra, Australia, 1993.
- [Wis79] Warren J. WISCOMBE. « Mie scattering calculations: advances in technique and fast, vector-speed computer codes ». NCAR/TN 140+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, June 1979. Edited/revised August 1996.
- [Wis80] Warren J. WISCOMBE. « Improved Mie scattering algorithms ». *Applied Optics*, 19(9):1505–1509, May 1980.
- [WNDS99] M. WOO, J. NEIDER, T. DAVIS, et D. SHREINER. *OpenGL programming guide - The official guide to learning OpenGL*. Addison-Wesley, 1999.

- [YDK97] Yitzhak YITZHAKY, Itai DROR, et Norman S. KOPEIKA. « Restoration of atmospherically blurred images according to weather-predicted atmospheric modulation transfer functions ». *Opt. Eng.*, 36(11):3064–3072, November 1997.
- [ZK94] E. P. ZEGE et A. A. KOKHANOVSKY. « Analytical solution to the optical transfer function of a scattering medium with large particles ». *Applied Optics*, 33(27):6547–6554, September 1994.
- [Zou94] Vadim ZOUBOFF. « Tentative de modélisation d'images vues à travers un milieu perturbant ». Dans *Actes des journées Sciences de l'Ingénieur 1994*, volume 1, pages 281–287, Octobre 1994.

ANNEXES

Annexe A

Répartition géographique du brouillard en France

Les planches des pages suivantes, reproduites avec l'autorisation de Météo-France, ont été établies à partir des observations de 144 stations météorologiques, pendant les dix années 1951-1960 [Bes69].

Est considérée comme « jour avec brouillard » toute journée au cours de laquelle la visibilité horizontale a été à un moment quelconque réduite à moins d'un kilomètre par du brouillard ou par un météore d'apparence analogue.

L'observation continue du temps n'étant pas constamment assurée à toutes les stations prises en compte, les nombres moyens ne sont qu'approximatifs et les cartes ne peuvent fournir que des indications grossières sur la répartition de ces nombres de jours.

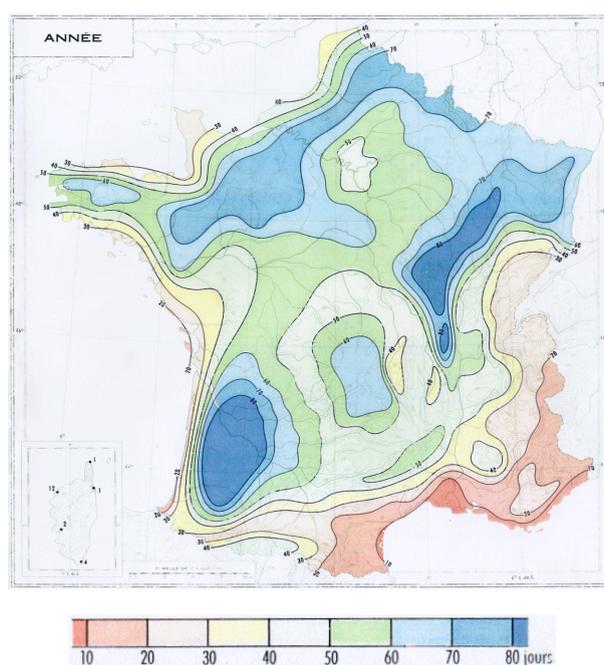


FIG. A.1 – Distribution du nombre annuel moyen de jours avec brouillard (visibilité météorologique inférieure à 1 km) en France, calculée sur la période 1951-1960 (source Météo-France).

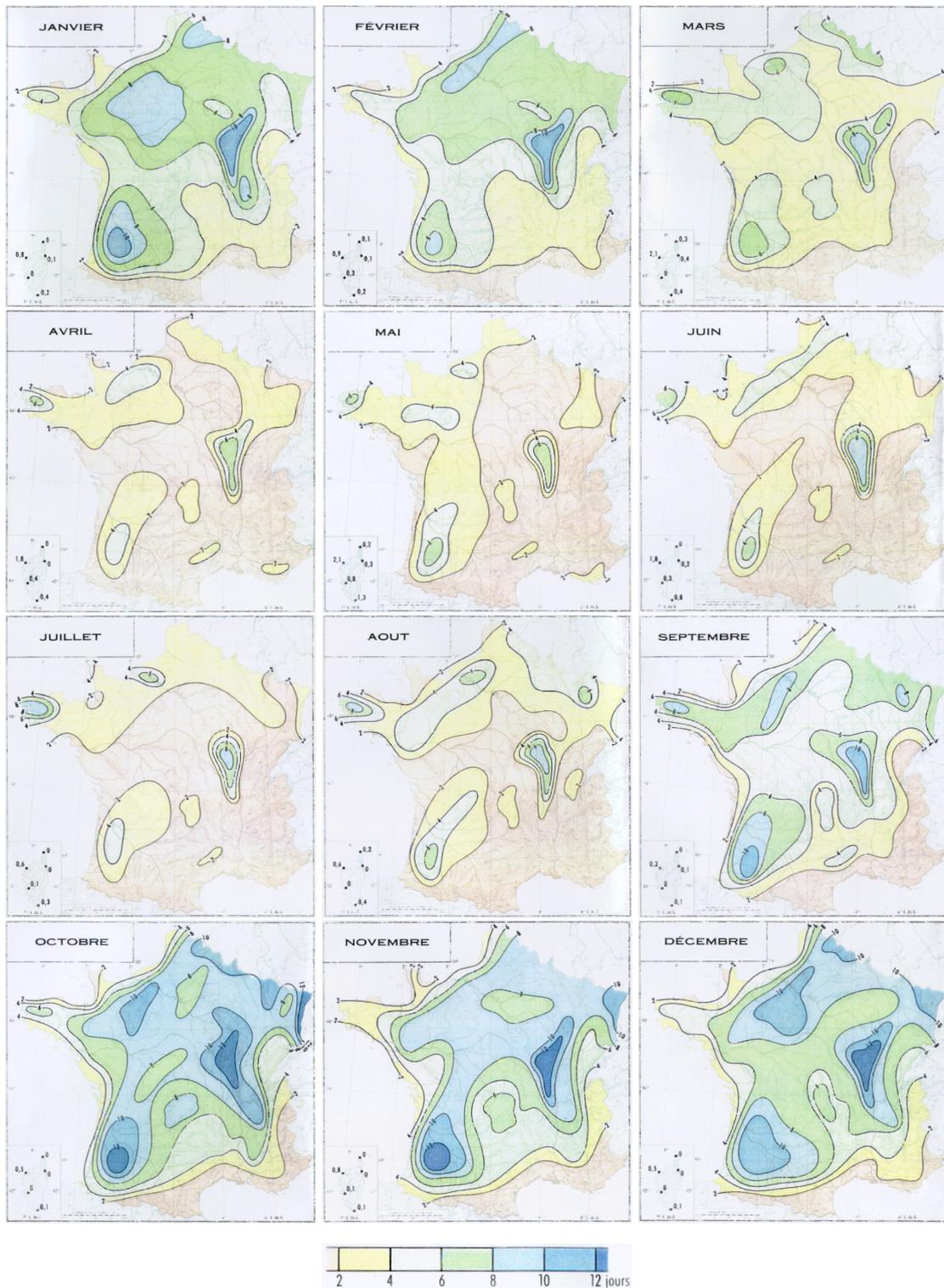


FIG. A.2 – Distribution du nombre mensuel moyen de jours avec brouillard (visibilité météorologique inférieure à 1 km) en France, calculée sur la période 1951-1960 (source Météo-France).

Annexe B

Résultats de simulation

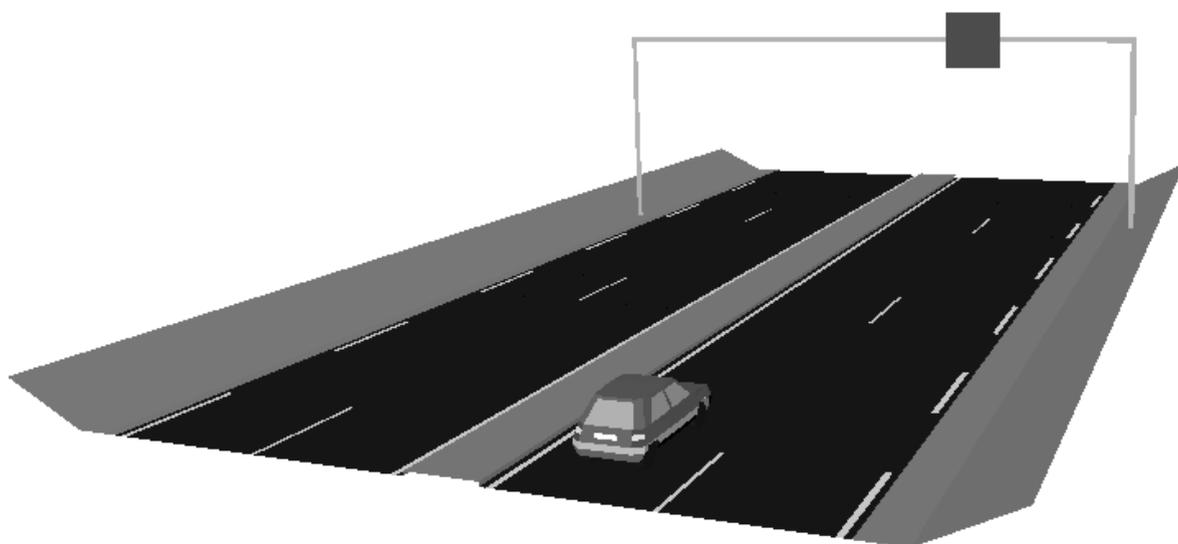


FIG. B.1 – Description géométrique de la scène routière utilisée pour calculer les cartes d'isoluminance de la figure B.2 à l'aide du code de simulation PROF.



(a) Sans brouillard.



(b) Visibilité météorologique 50 m, fonction de phase isotrope.

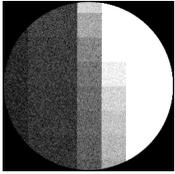
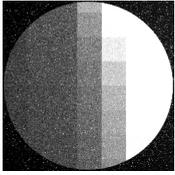
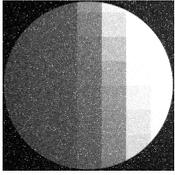
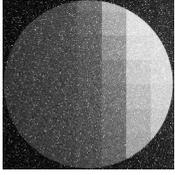
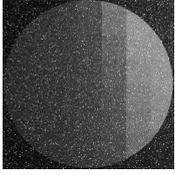
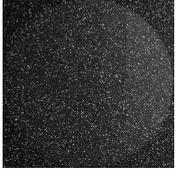
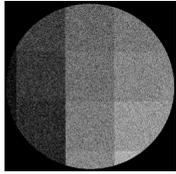
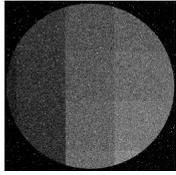
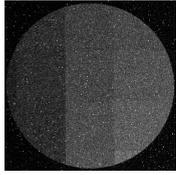
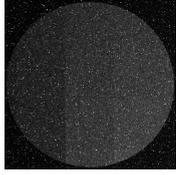
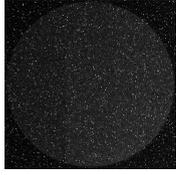
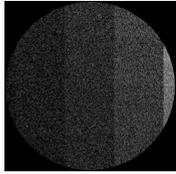
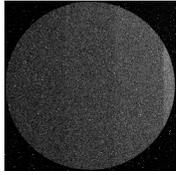
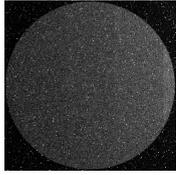
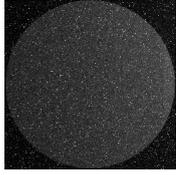
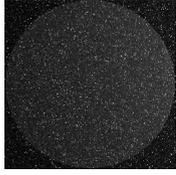


(c) Visibilité météorologique 50 m, granulométrie centrée sur $1 \mu\text{m}$ de diamètre.



(d) Visibilité météorologique 50 m, granulométrie centrée sur $10 \mu\text{m}$ de diamètre.

FIG. B.2 – Résultats de simulation de la propagation de la lumière dans le brouillard par tracé de photons semi-Monte-Carlo, appliqué sur la scène routière dont le schéma est présenté en figure B.1, avec différents types de brouillard.

K [m^{-1}]	0,00	0,03	0,06	0,10	0,15	0,25
Cible n°1						
L [$cd.m^{-2}$]	10,1	6,46	4,28	2,54	1,76	1,20
Cible n°2						
L [$cd.m^{-2}$]	1,74	1,30	0,944	0,690	0,534	0,463
Cible n°3						
L [$cd.m^{-2}$]	0,566	0,865	0,890	0,837	0,831	0,768

TAB. B.1 – Images et luminances de trois cibles lambertiennes (facteur de réflexion égal à 0,93) observées à travers un brouillard à différentes phases de sa dissipation.

K [m^{-1}]	0,00	0,03	0,06	0,10	0,15	0,25
Cible n°1						
L [cd.m^{-2}]	0	0,0619	0,233	0,347	0,682	0,906
Cible n°2						
L [cd.m^{-2}]	0	0,0235	0,0697	0,136	0,238	0,344
Cible n°3						
L [cd.m^{-2}]	0	0,0370	0,110	0,235	0,438	0,627

TAB. B.2 – Images et luminances de trois cibles absorbantes (facteur de réflexion nul) observées à travers un brouillard à différentes phases de sa dissipation.