

Simulation photométrique des effets du brouillard sur la vision*

Photometric simulation of fog effects on vision

E. Dumont

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, boulevard Lefebvre - 75732 Paris cedex 15
dumont@lcpc.fr

Résumé

Cet article présente une approche basée sur le traitement d'images pour simuler les effets visuels du brouillard. La méthode proposée fait appel à un modèle photométrique basé sur deux théories complémentaires de la vision à travers l'atmosphère, en distinguant les zones primaires (signaux lumineux) et secondaires (surfaces réfléchissantes) de l'environnement visuel. À condition de disposer d'informations géométriques et photométriques détaillées sur la scène observée, ce modèle générique permet de simuler les dégradations du signal visuel liées à la diffusion de la lumière naturelle et artificielle par une série de traitements dépendants de la distance. La faisabilité et l'intérêt de cette approche sont illustrés par une application dans le domaine de la conduite automobile.

Mots Clef

Brouillard, vision, simulation, traitement d'images.

Abstract

This paper presents an image processing approach to simulate fog visual effects. The underlying photometrical model is based on two concurrent theories of vision through the atmosphere, which deal separately with primary zones (light sources) and secondary zones (reflecting surfaces) in the field of vision. Provided that a detailed geometric and photometric description of the observed scene is available, this unified model can be used to apply fog effects onto the image of the scene through a combination of depth-dependent operations. Sample results are presented to illustrate the relevance of the presented simulation technique, in the case of road visibility.

Keywords

Fog, vision, simulation, image processing.

1 Introduction

Le brouillard soulève des problèmes de sécurité non négligeables dans tous les domaines de transport, notamment en circulation routière. Dans ce contexte, la simulation est une approche incontournable pour mettre au point et valider des solutions susceptibles de compenser la perte de visibilité induite par le brouillard. En effet, les expérimentations en conditions réelles sont extrêmement difficiles à réaliser, principalement en raison de l'absence de contrôle sur le brouillard lui-même.

Deux approches sont envisageables pour simuler la vision par temps de brouillard : la synthèse et le traitement d'images. La première approche consiste à simuler les échanges lumineux entre les sources et les surfaces qui constituent la scène, en tenant compte des interactions avec le milieu diffusant, ce qui implique des calculs complexes d'illumination globale [16]. La seconde approche consiste à simuler les perturbations de l'image de la scène qui résultent de la diffusion de la lumière dans l'atmosphère [3]. Initialement, cette approche avait été développée dans le cadre de l'imagerie satellitaire. Les tentatives pour l'appliquer aux problèmes de visibilité horizontale que pose le brouillard dans les transports se sont heurtées jusqu'à présent au fait que les effets du brouillard varient en fonction de la distance d'observation [13, 17].

Dans le présent article, on montre que la simulation des effets visuels du brouillard par traitement d'images est rendue possible sous la forme d'une chaîne de traitements 2D $\frac{1}{2}$, c'est-à-dire dépendants de la profondeur dans le champ de vision. On commence par décrire les mécanismes optiques qui causent les perturbations du signal visuel dans le brouillard. On rappelle également la théorie de Koschmieder et la théorie de la fonction de transfert de modulation (FTM) de l'atmosphère, qui permettent de caractériser ces perturbations dans différentes conditions. On présente ensuite un modèle photométrique qui unifie ces deux théories pour caractériser les effets visuels du brouillard. On montre finalement comment ce modèle générique peut être implémenté pour simuler une scène dans le brouillard par traitement d'images, et on présente des images de scène routière générées selon cette méthode. En conclusion, on discute

* Ces travaux ont été menés au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, en collaboration avec l'équipe « Systèmes Intelligents de Perception » de l'Université Paris V, sous la direction du Prof. G. Stamon et du Dr. J. Louchet.

la pertinence et la validité de la technique de simulation proposée, et on propose des perspectives d'amélioration et d'application.

2 Mécanismes de perturbation du signal visuel par le brouillard

2.1 Composition du signal visuel

Un observateur perçoit la scène qu'il regarde grâce à la luminance émise dans sa direction par les éléments qui la constitue. Cette luminance provient de l'éclairage naturel d'une part, et de l'éclairage artificiel d'autre part. En conditions normales de visibilité, une fraction de cette énergie lumineuse atteint directement l'observateur, et le reste illumine les surfaces de la scène. Ces dernières deviennent des sources secondaires, et réfléchissent une fraction de l'énergie qu'elles reçoivent directement vers l'observateur. Comme l'illustre la figure 1, l'image qui se forme en entrée du système visuel est ainsi composée de zones primaires et secondaires, selon que la lumière reçue a suivi un chemin direct depuis une source lumineuse, ou bien un chemin indirect passant par une surface réfléchissante.

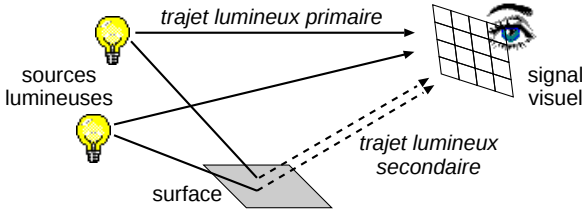


FIG. 1 – Le champ de vision contient des zones primaires (sources lumineuses) et des zones secondaires (surfaces réfléchissantes). La diffusion par le brouillard a lieu sur les trajets de la lumière entre les sources, les surfaces et l'observateur.

2.2 Diffusion de la lumière

En présence de brouillard, la lumière qui se propage dans la scène interagit avec une multitude de gouttelettes microscopiques (leur diamètre varie entre plusieurs dixièmes et quelques dizaines de microns) en suspension dans l'air [10]. Chaque particule absorbe et diffuse les longueurs d'onde visibles. Selon la théorie de Mie, la répartition directionnelle de l'énergie lumineuse diffusée dépend fortement du paramètre de taille : plus les gouttelettes sont grosses, plus la diffusion avant (dans la direction incidente) est importante.

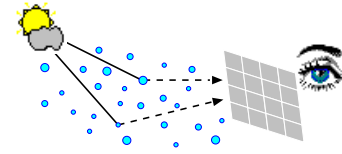
La lumière subit de multiples diffusions sur son trajet à travers le brouillard. D'après la loi de Beer-Lambert, le flux Φ transmis entre deux points distants d'une longueur d est atténué d'un facteur égal à la transmissivité e^{-Kd} , K étant le coefficient d'extinction du milieu diffusant, c'est-à-dire sa densité optique linéique :

$$\Phi(d) = e^{-Kd}\Phi(0) \quad (1)$$

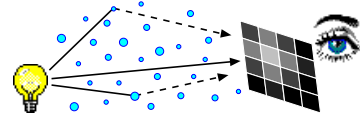
2.3 Effets du brouillard sur le signal visuel

L'effet principal du brouillard sur le signal visuel est l'atténuation de la luminance transmise, du fait des interactions de la lumière avec les gouttelettes. Cet effet d'extinction est décrit par la loi de Beer-Lambert (équation 1). Notons qu'il a lieu non seulement entre les éléments de la scène et l'observateur, mais également entre les sources lumineuses et les surfaces réfléchissantes.

L'énergie diffusée est entièrement redistribuée dans la scène. Une fraction de cette énergie atteint l'observateur, générant des perturbations dans le signal visuel. Le phénomène de diffusion est ainsi la cause de deux effets majeurs, illustrés dans la figure 2.



(a) Effet de voile atmosphérique.



(b) Effet de halo.

FIG. 2 – L'effet de voile atmosphérique et l'effet de halo sont les deux perturbations majeures causées par la lumière diffusée dans le signal visuel : le premier est lié à l'éclairage naturel, le second est lié à l'éclairage artificiel.

Le premier effet est causé par la diffusion de la lumière du ciel. D'après la théorie de Koschmieder, rapportée en détails par Middleton [12], la luminance L_v du voile atmosphérique qui se superpose à l'image d'un objet situé à une distance d est liée à la luminance L_b du brouillard à l'horizon :

$$L_v = (1 - e^{-Kd}) L_b \quad (2)$$

Le second effet est causé par la diffusion de la lumière émise par les sources lumineuses artificielles. D'après la théorie de la Fonction de Transfert de Modulation (FTM) atmosphérique [11], le halo lumineux qui en résulte est équivalent à l'effet d'une convolution de l'image de l'objet lumineux observé avec la réponse impulsionnelle du brouillard. Cette réponse est la transformée de Fourier (TF) inverse de la FTM, qui dépend de la distance d'observation. La FTM dépend également de la composition granulométrique du milieu diffusant [5, 14]. En faisant l'analogie entre une « tranche » de brouillard homogène et un filtre

optique, il est possible de déduire la FTM M d'une tranche d'épaisseur d et de coefficient d'extinction K à partir de la FTM M_1 d'une tranche de brouillard de granulométrie identique et de densité optique¹ unitaire :

$$M = M_1^{Kd} \quad (3)$$

La fonction M_1 , dont des exemples sont présentés en figure 3, est appelée « opérateur fréquentiel de contraste » (OFC) [7].

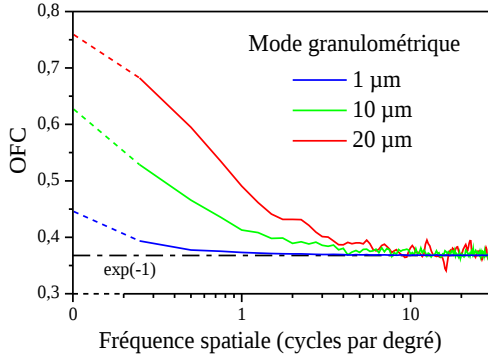


FIG. 3 – Influence de la taille des gouttelettes du brouillard sur l'opérateur fréquentiel de contraste, qui caractérise l'effet de halo autour des sources lumineuses (données obtenues par la méthode de Monte-Carlo [4]).

3 Modèle photométrique des effets visuels du brouillard

À partir de la loi de Beer-Lambert, et en se basant sur l'analyse précédente des mécanismes de réduction de la visibilité liés à la diffusion de la lumière, il est possible de proposer un modèle étendu des effets visuels du brouillard. Le signal visuel perturbé est calculé en trois étapes :

1. atténuation des zones secondaires,
2. convolution des zones primaires,
3. addition du voile atmosphérique.

Pour la première étape, la luminance intrinsèque² des surfaces visibles doit être séparée en deux composantes : L_0 due à l'éclairage par le ciel, et $L_{s \in [1, n]}$ due à chacune des n sources lumineuses qui contribuent à l'éclairage de la scène observée. La luminance des zones secondaires transmise à travers le brouillard, L_{sec} , est calculée en appliquant le facteur d'atténuation de Beer-Lambert à deux reprises : d'abord pour les trajets de longueur d_s parcourus par la lumière entre les sources et un élément de surface, puis pour le trajet de longueur d entre cet élément et l'observateur.

$$L_{sec} = e^{-Kd} \left(L_0 + \sum_{s=1}^n e^{-Kd_s} L_s \right) \quad (4)$$

1. La densité optique est le produit du coefficient d'extinction K par la distance d .

2. La luminance intrinsèque d'un objet correspond à la luminance mesurée à très courte distance.

Pour la deuxième étape, la composante intrinsèque L_s de chaque objet lumineux est « répartie » sur les zones voisines dans le signal visuel en utilisant la réponse impulsionnelle du brouillard comme noyau de convolution. La réponse est obtenue par transformée de Fourier inverse de la FTM de la tranche de brouillard d'épaisseur d séparant l'objet de l'observateur. La FTM est elle-même déduite de l'OFC M_1 qui caractérise le brouillard, à l'aide de l'équation 3. La luminance des zones primaires transmise à travers le brouillard, L_{pri} , s'exprime ainsi sous la forme suivante :

$$L_{pri} = L_s * \text{TF}^{-1} \{ M_1^{Kd} \} \quad (5)$$

La troisième et dernière étape consiste à ajouter la luminance de voile atmosphérique, dont l'expression est donnée par l'équation 2, au résultat des deux étapes précédentes, afin de calculer la luminance apparente L perçue par l'observateur :

$$L = L_{\{pri|sec\}} + (1 - e^{-Kd}) L_b \quad (6)$$

$L_{\{pri|sec\}}$ correspond soit à L_{pri} pour les zones primaires, soit à L_{sec} pour les zones secondaires du signal visuel ; L_b est la luminance du brouillard.

4 Simulation visuelle du brouillard par traitement d'images

4.1 Description de la scène

Pour pouvoir utiliser le modèle proposé afin de calculer la distribution bidimensionnelle de luminance $L(i, j)$ dans le champ de vision d'un observateur dans le brouillard, il est nécessaire de disposer d'informations géométriques et photométriques détaillées sur la scène observée.

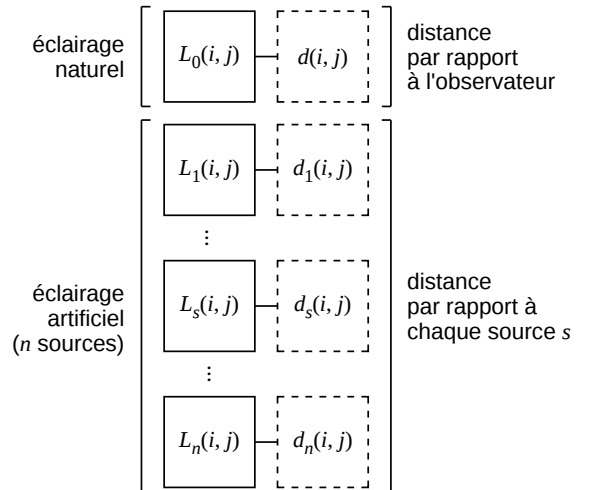


FIG. 4 – Pour simuler les effets du brouillard sur l'environnement visuel d'un observateur par traitement d'images, il est nécessaire de disposer d'une description géométrique et photométrique détaillée de la scène.

$$L(i,j) = \begin{cases} e^{-Kd(i,j)} (L_0(i,j) + \sum_{s=1}^n e^{-Kd_s(i,j)} L_s(i,j)) \\ L_s(i,j) * \text{TF}^{-1} \{ M_1^{Kd(i,j)} \} \end{cases} + (1 - e^{-Kd(i,j)}) L_b \quad (7)$$

Pour chaque direction d'observation (i,j) (qui correspond à un pixel de l'image de la scène), la distance $d(i,j)$ de l'élément visé ainsi que sa luminance intrinsèque « naturelle » $L_0(i,j)$ doivent être connues. De plus, la distance $d_s(i,j)$ entre l'élément visé et chaque source lumineuse s illuminant la scène doit être connue, de même que la luminance $L_s(i,j)$ générée par la source s sur cet élément ; si l'élément visé appartient à la surface de cette source, alors $L_s(i,j)$ constitue sa luminance intrinsèque « artificielle » et $d_s(i,j)$ est nulle. Ainsi, lorsque la scène contient n sources lumineuses, un total de $n + 1$ distributions de luminance et de distance sont nécessaires pour simuler les effets du brouillard sur l'image de la scène, comme le montre le schéma de la figure 4.

En ce qui concerne le brouillard, ce sont le coefficient d'extinction K , l'OFC M_1 et la luminance à l'horizon L_b , qui doivent être spécifiés pour pouvoir appliquer le modèle proposé.

4.2 Implémentation du modèle

La simulation des perturbations induites par le brouillard dans le signal visuel $L(i,j)$ nécessite trois étapes successives, appliquées à tous les pixels :

1. le double effet d'extinction est appliqué en atténuant la luminance des pixels des zones secondaires selon l'équation 4 ;
2. l'effet de halo est appliqué en filtrant le contraste des zones primaires selon l'équation 5 ;
3. la luminance de voile atmosphérique est ajoutée dans toute l'image selon l'équation 6.

Cette série de traitements peut être formalisée sous la forme de l'équation 7 : la première branche s'applique aux pixels des zones secondaires, et la seconde branche s'applique aux pixels des zones primaires. En théorie, il n'y a pas lieu de différencier le traitement de ces deux types de zone. Mais en pratique, l'effet de halo au niveau des reflets sur les surfaces secondaires est rendu négligeable par l'effet d'extinction. Cela permet de remplacer la convolution, coûteuse en temps de calcul, par une simple atténuation exponentielle. L'implémentation proposée en figure 5 met en œuvre ce compromis.

4.3 Exemple de mise en œuvre

Afin de démontrer la faisabilité et l'intérêt de la technique proposée dans cet article pour simuler les effets visuels du brouillard, nous l'avons mise en œuvre dans le cas concret d'un automobiliste circulant sur une route de rase-campagne, de nuit et de jour, dans deux brouillards de distributions granulométriques différentes, pour une visibilité mé-

```

/* Initialisation de l'image */
Pour tous les pixels [i,j], faire
  L[i,j] := 0.0
Fin
/* Traitement de l'image */
Pour tous les pixels [i,j], faire
  /* Atténuation des zones secondaires */
  Si [i,j] est un pixel secondaire, alors faire
    /* éclairage naturel */
    x := L[0][i,j]
    /* atténuation de l'éclairage artificiel */
    Pour toutes les sources [s], faire
      x += exp(-K*d[s][i,j]) * L[s][i,j]
    Fin
    /* atténuation de la luminance transmise */
    L[i,j] += exp(-K*d[i,j]) * x
  Fin
  /* Filtrage des zones primaires */
  Ou si [i,j] est un pixel primaire, alors faire
    /* calcul de la FTM */
    M = M1 ^ (K*d[i,j])
    /* transformée de Fourier inverse */
    R = TF(M,-1)
    /* convolution */
    Pour tous les pixels [i+a,j+b] du voisinage, faire
      L[i+a,j+b] += L[s][i,j] * R[a,b]
    Fin
  Fin
  /* Addition du voile atmosphérique */
  L[i,j] += (1 - exp(-K*d[i,j])) * Lb
Fin

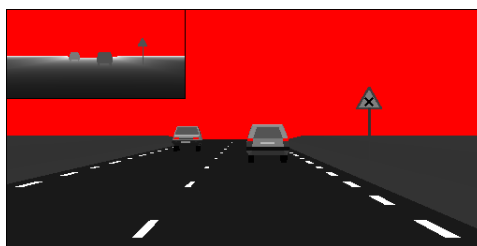
```

FIG. 5 – Implémentation (pseudo-code) du modèle photométrique étendu des effets du brouillard sur la vision formalisé par l'équation 7.

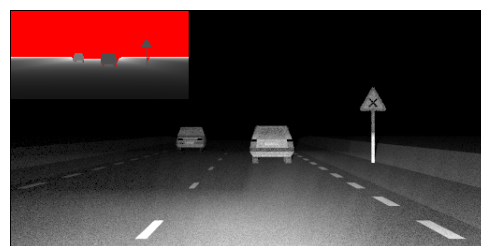
téorologique³ de 100 m. Le cas particulier de la conduite automobile a nécessité la prise en compte d'un effet de voile supplémentaire, généré par la diffusion de la lumière des projecteurs à l'avant du véhicule selon le principe illustré en figure 6(a). La distribution de luminance du voile rétrodiffusé a donc été pré-calculée à l'aide d'un code de tracé de photons de type Monte-Carlo [4] pour chaque type de brouillard. Les voiles rétrodiffusés ainsi obtenus, présentés en figure 6(b), ont été ajoutés aux images calculées, comme pour le voile atmosphérique.

La description 2D½ de l'environnement visuel du conducteur est donnée en figure 7. Les résultats de la simulation sont donnés sous forme de cartes d'iso-luminance en fausses couleurs, dans la figure 8 pour la situation nocturne, et dans la figure 9 pour la situation diurne.

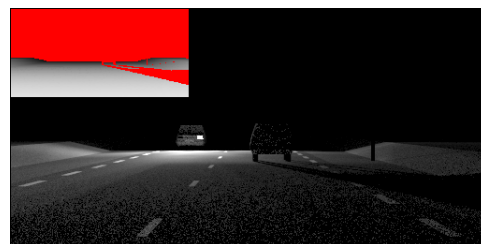
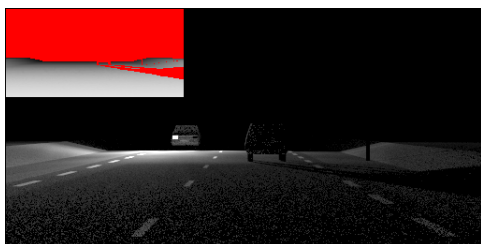
3. La visibilité météorologique est liée au coefficient d'extinction par la relation $V = 3/K$.



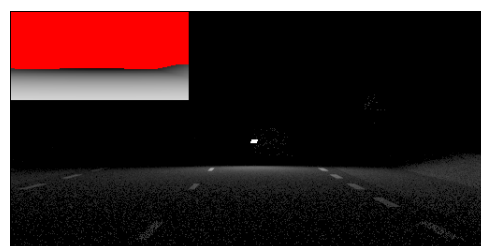
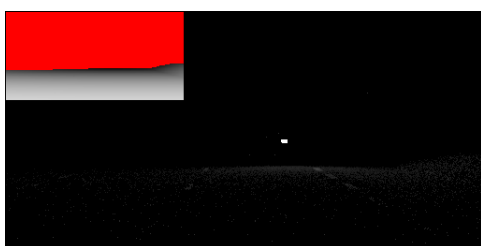
(a) Éclairage naturel.



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

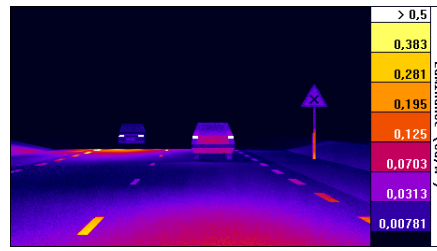


(c) Éclairage dû aux projecteurs du véhicule croisé (distant de 150 m).



(d) Éclairage dû aux feux du véhicule suivi (distant de 75 m).

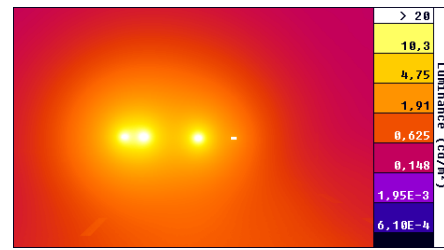
FIG. 7 – Cartes d'iso-luminance et d'iso-distance (en écusson) décrivant l'éclairage dans une scène routière de rase-campagne, selon le principe illustré dans la figure 4. La couleur rouge désigne les zones de ciel (distance infinie), et les zones non-éclairées par une source (distance indéfinie). Ces données ont été calculées par une méthode de tracé de photons [4].



(a) Sans brouillard.



(b) Brouillard de petites gouttelettes.

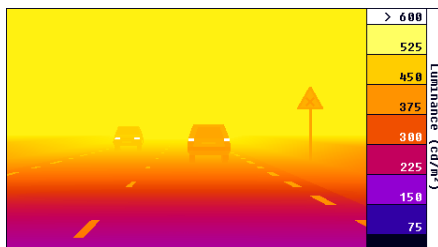


(c) Brouillard de grosses gouttelettes.

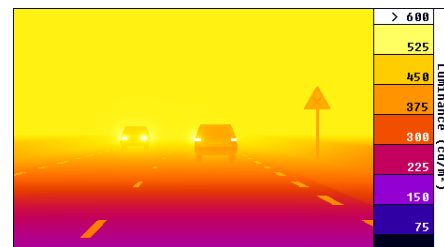
FIG. 8 – Cartes d’iso-luminance dans le champ visuel d’un automobiliste conduisant de nuit sur une route de rase-campagne par temps clair (a) et par temps de brouillard – 100 m de visibilité météorologique – avec des distributions granulométriques centrées sur $1\ \mu\text{m}$ (b) et $10\ \mu\text{m}$ (c).



(a) Sans brouillard.

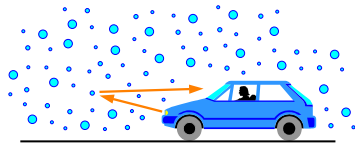


(b) Brouillard de petites gouttelettes

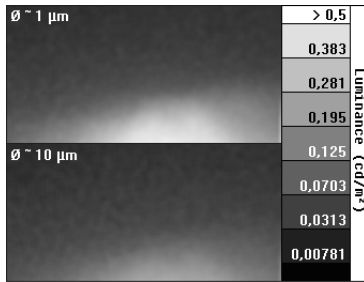


(c) Brouillard de grosses gouttelettes

FIG. 9 – Cartes d’iso-luminance dans le champ visuel d’un automobiliste conduisant de jour sur une route de rase-campagne par temps de brouillard – 100 m de visibilité météorologique, et $500\ \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ de luminance de brouillard – avec des distributions granulométriques centrées sur $1\ \mu\text{m}$ (b) et $10\ \mu\text{m}$ (c).



(a) Rétrodiffusion.



(b) Voiles rétrodiffusés pré-calculés.

FIG. 6 – Le flux lumineux rétrodiffusé par le brouillard génère un effet de voile supplémentaire qui dépend de la taille des gouttelettes.

Ces résultats montrent que l'importance relative des différents effets visuels du brouillard dépend fortement des conditions d'éclairage (nuit ou jour) et de la nature microphysique du brouillard (taille des gouttelettes). L'effet d'extinction est à l'origine des perturbations les plus importantes dans l'environnement visuel de l'automobiliste. De jour, seuls les détails proches restent visibles, tandis que les détails lointains se fondent progressivement dans le voile atmosphérique. De nuit, le brouillard occulte tous les détails de la scène (signalisation horizontale et verticale), laissant uniquement apparaître les projecteurs et les feux des autres véhicules. Quant à l'effet de halo, il est beaucoup plus lumineux et localisé dans le cas où le brouillard est constitué de grosses gouttelettes, ce qui le rend observable même lorsqu'il est mélangé avec le voile atmosphérique de jour.

Cet exemple illustre la complexité des effets photométriques du brouillard, et montre la nécessité d'une étude plus approfondie pour appréhender ses conséquences sur la visibilité, en croisant le modèle des effets visuels du brouillard avec des modèles de vision [1, 9].

5 Conclusion

5.1 Discussion

La technique de simulation présentée dans cet article permet de prédire les perturbations de l'environnement visuel d'un observateur dans le brouillard, quelles que soient les conditions d'éclairage (jour, nuit ou conditions crépusculaires), et quelle que soit la nature des éléments contenus

dans la scène (surfaces réfléchissantes ou lumineuses). Mais cette extension du domaine d'application de la théorie initiale de Koschmieder est obtenue au prix d'une certaine complexité, car elle implique la connaissance d'informations géométriques et photométriques détaillées, même si des simplifications sont possibles dans certaines situations particulières.

D'autre part, cette technique de simulation repose sur les mêmes hypothèses et les mêmes approximations que les théories qu'elle met en œuvre. Ainsi, dans la théorie de Koschmieder, le brouillard est supposé spatialement homogène, ce qui ne permet pas de traiter les gradients de densité qu'un observateur est susceptible de rencontrer au cours de son déplacement (l'entrée dans une nappe de brouillard, par exemple). De plus, la théorie de la FTM atmosphérique suppose des sources émettant de manière isotrope dans la direction de l'observateur, ce qui constitue une approximation acceptable pour la plupart des signaux lumineux (feux de véhicule ou de signalisation), mais grossière lorsqu'il s'agit de simuler des sources dont les caractéristiques photométriques sont plus complexes (projecteurs de véhicule, luminaires d'éclairage).

En outre, le choix d'une approche basée sur le traitement d'images pour simuler les effets du brouillard introduit certaines contraintes. Ainsi, le phénomène de halo ne peut pas être appliqué aux sources lumineuses lorsqu'elles sont partiellement ou totalement occultées dans le champ visuel. De plus, l'énergie lumineuse diffusée par le brouillard n'est pas prise en compte dans le calcul de la luminance intrinsèque des surfaces. Seule la synthèse d'images par calcul d'illumination globale permettrait de résoudre ces problèmes, avec moins de souplesse, néanmoins, que l'approche présentée. En effet, le modèle sous-jacent peut être adapté pour prendre en compte des phénomènes particuliers, tels que le voile rétrodiffusé dans le cas de la conduite automobile qui est traité en exemple.

5.2 Validation

L'évaluation de la validité photométrique de la technique de simulation présentée par comparaison à des mesures se heurte aux difficultés inhérentes aux expérimentations en brouillard naturel. En premier lieu, il est rare de pouvoir prévoir le lieu et l'heure de l'occurrence du brouillard avec une précision suffisante pour pouvoir organiser des mesures photométriques en situation réelle ; de plus, il est impossible de maîtriser les conditions de mesure (éclairage extérieur, microstructure du brouillard). Une telle validation est donc envisageable à la condition de pouvoir mettre en place une logistique adaptée, avec un système de mesure automatisé (appareils de mesure photométriques et microphysiques asservis à un appareil mesurant la visibilité météorologique) qui pourrait être installé à demeure sur un site protégé, équipé de surfaces réfléchissantes et émettrices à différentes distances d'une caméra étalonnée en luminance. Les expérimentations en brouillard artificiel permettent de résoudre une partie de ces problèmes, mais

les contraintes géométriques (dimensions des installations) limitent fortement les possibilités [7].

Une validation psychophysique a néanmoins été entreprise, basée sur la reproduction en simulation de l'effet de surestimation des distances observé en brouillard artificiel [2]. Cette expérimentation a débouché sur des conclusions mitigées. Toutefois, elle ne remet pas en cause la technique de simulation des effets visuels du brouillard, mais plutôt la technique de transposition des images photométriques en images digitales affichables. Cette étape incontournable de la simulation visuelle reste problématique lorsqu'on envisage des études de visibilité [18].

5.3 Perspectives

Certaines améliorations de la technique présentée pour simuler les effets du brouillard sur la vision sont possibles et souhaitables. Lorsque des informations chromatiques concernant les sources et les matériaux de la scène simulée sont disponibles, il est notamment envisageable d'appliquer la méthode présentée sur la composante achromatique de l'image de la scène éclairée par chaque source, et de combiner ensuite les résultats dans un espace colorimétrique additif, pour obtenir une simulation en couleurs [7]. Il est également envisageable d'étendre la technique présentée afin de pouvoir traiter le cas des milieux hétérogènes, en exploitant à nouveau l'analogie entre une tranche de brouillard et un filtre optique, mais cette fois en combinant des tranches de différentes densités. Il serait ainsi possible de simuler le phénomène de nappe de brouillard, particulièrement gênant sur le plan de la visibilité.

En termes d'application, l'approche par traitement d'images pour simuler le brouillard offre des perspectives pour l'amélioration des simulateurs de conduite automobile [6], et des simulateurs de pilotage en général (train, avion, navire, etc.) ; en effet, pour respecter la contrainte du temps-réel, la plupart de ces systèmes se contentent de créer une « impression » de brouillard, dont le réalisme est purement subjectif, grâce à des effets spéciaux qui ne sont souvent que de grossières approximations des phénomènes physiques simulés. L'approche proposée offre aussi des perspectives pour la mise au point d'outils d'aide à la vision en conditions de visibilité dégradée [8, 15], en permettant aux concepteurs de tester leurs solutions dans des environnements virtuels, et donc parfaitement contrôlés.

Références

- [1] W.K. Adrian, Visibility of targets: model for calculation, *Lighting Research and Technology*, Vol. 21, Num. 4, pp. 181-188, 1989.
- [2] V. Cavallo, E. Dumont, G. Gallée, Experimental validation of extended fog simulation techniques, *DSC 2002 (Proceedings of the 7th Driving Simulation Conference)*, INRETS, pp. 329-340, 2002.
- [3] A.S. Drofa, I.L. Katsev, Certain problems of seeing through clouds and fogs, *Meteorology i Gidrologiya*, Vol. 11, pp. 101-109, 1981.
- [4] E. Dumont, Semi-Monte-Carlo light tracing for the study of road visibility in fog, *Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods 1998*, Springer-Verlag, pp.177-187, 1998.
- [5] E. Dumont, Fog effects on road visibility, *CIE Publication No. 133 (Proceedings of the 24th Session of the CIE)*, Vol. 2, pp. 196-200, 1999.
- [6] E. Dumont, E. Follin, G. Gallée, Improved fog rendering for driving simulation, *DSC 2000 (Proceedings of the 5th Driving Simulation Conference)*, INRETS, pp. 193-201, 2002.
- [7] E. Dumont, *Caractérisation, modélisation et simulation des effets visuels du brouillard pour l'utilisateur de la route*, Thèse de Doctorat de l'Université René Descartes (Paris V), 2002.
- [8] N. Hautière, D. Aubert, Driving assistance: automatic fog detection and measure of the visibility distance, to be published in *ITS World 2003 (Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Transport Systems)*.
- [9] L. Itti, C. Koch, Computational modelling of visual attention, *Nature Reviews | Neurosciences*, Vol. 2, Num. 3, pp. 194-203, 2001.
- [10] A.A. Kokhanovsky, *Optics of light scattering media: problems and solutions*, Wiley-Praxis, 1999.
- [11] R.F. Lutomirski, Atmospheric degradation of electro-optical system performance, *Applied Optics*, Vol. 17, Num. 24, pp. 3915-3921, 1978.
- [12] W.E.K. Middleton, *Vision through the atmosphere*, University of Toronto Press, 1952.
- [13] N. NAMEDA, Fog modulation transfer function and signal lighting, *Lighting Research & Technology*, Vol. 24, Num. 2, pp. 103-106, 1992.
- [14] S.G. Narasimhan, Models and algorithms for vision in bad weather, Thesis Proposal, Columbia University, New York (NY), 2003.
- [15] S.K. Nayar, S.G. Narasimhan, Vision in bad weather, *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol. 2, pp. 820-827, 1999.
- [16] F. Pérez, X. Pueyo, F.-X. Sillion, Global illumination techniques for the simulation of participating media. *Rendering Techniques '97 (Proceedings of the 8th Eurographics Workshop on Rendering)*, Springer-Verlag, pp. 309-320, 1997.
- [17] Z.-Q. Sang, M.-Y. Ding, T.-X. Zhang, Imaging for outdoor scene in rain and fog, *Acta Electronica Sinica*, Vol. 28, Num. 3, pp. 131-133, 2000.
- [18] F. Viénot, C. Boust, E. Da Costa, R. Brémond, E. Dumont, Psychometric assessment of the look and feel of digital images, *DSC 2002 (Proceedings of the 7th Driving Simulation Conference)*, INRETS, pp. 301-311, 2002.