

Approche de la vision dans le brouillard par la fonction de transfert de contraste

Eric DUMONT

Division Exploitation, signalisation, éclairage
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Vadim ZOUBOFF

Section Propagation des ondes
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers

RÉSUMÉ

Dans le but de caractériser physiquement les effets du brouillard sur la perception de la route, une approche par le traitement du signal a été utilisée.

Considérant que le contraste est à la source des mécanismes du système visuel, on émet l'hypothèse de linéarité et d'invariance spatiale du brouillard, afin de déterminer sa fonction de transfert de contraste (FTC).

La mise en œuvre d'une telle approche a été étudiée expérimentalement par des mesures en brouillard artificiel, et théoriquement par des simulations utilisant une méthode de Monte-Carlo.

Les résultats expérimentaux et théoriques ont été comparés et les conclusions permettent certaines perspectives concernant l'emploi du traitement du signal pour caractériser les effets du brouillard sur la visibilité.

MOTS CLÉS : 83 - Visibilité - Brouillard - Traitement de l'information - Signal - Contraste - Granulométrie (granularité) - Transfert - Simulation - Mesure.

Introduction

La possibilité de simuler la conduite en visibilité réduite permettrait d'améliorer l'efficacité des aménagements routiers. Mais un simulateur nécessite la modélisation des éléments tels que le brouillard, qui perturbent la perception de la route. Jusqu'à présent, le brouillard était simplement caractérisé par sa densité optique, facteur qui tient compte uniquement de la transmission directe (loi de Beer-Lambert). Afin de modéliser les effets du brouillard en conservant un certain réalisme psychophysique, une description plus complète est nécessaire, qui tienne compte de la multi-diffusion. Une approche par le traitement du signal semble fournir des éléments de réponse.

Une première expérience a été réalisée par le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers, afin de caractériser le comportement du brouillard en tant que filtre optique [1], [2] et [3]. Cette étude a été poursuivie de manière théorique, par la simulation, au Laboratoire central des Ponts et Chaussées de Paris. Le présent article expose les bases de l'approche par le traitement du signal, ainsi que les résultats des études expérimentales et théoriques. Les conclusions tirées de la comparaison des résultats permettent de proposer des perspectives pour l'utilisation de cette approche physique de la visibilité dans le brouillard.

Le brouillard, filtre fréquentiel du contraste

Influence du brouillard sur la vision

Le système visuel fonctionne selon des mécanismes extrêmement complexes, mais qui peuvent être assimilés à une analyse fréquentielle spatio-temporelle du champ de vision stéréoscopique. L'environnement visuel est représenté par une distribution spatiale de luminances qui se projette sur la rétine. Les photorécepteurs oculaires transforment cette distribution d'énergie lumineuse (éclairage rétinien) en influx nerveux qui transitent vers le cerveau. À cette étape, l'information visuelle est caractérisée par sa structure spatiale (et temporelle), ainsi que sa photocolormétrie. À partir de ces indices « primaires », et des disparités binoculaires, le système visuel infère tous les autres indices visuels (la forme, la texture, la distance, le mouvement, la vitesse, etc.) qui définissent la visibilité.

Le brouillard perturbe la propagation de la lumière dans l'atmosphère en provoquant le phénomène de multidiffusion : chaque particule de l'aérosol diffuse l'énergie incidente dans toutes les directions de l'espace. Ainsi, l'énergie lumineuse qui parvient à la rétine peut avoir été diffusée plusieurs fois sur sa trajectoire.

Ce phénomène induit certaines modifications de la distribution spatiale de luminance utilisée par le système visuel. Ces perturbations sont à l'origine des effets du brouillard sur la visibilité (erreurs d'estimation des distances ou des vitesses, phénomène de halo, etc.) [4].

Approche par le traitement du signal

Tout système optique modifie le signal qui le traverse, agissant comme un filtre [5]. Il est souvent important de connaître précisément la nature de cette modification. Dans le cas où le système possède les propriétés de linéarité et d'invariance spatiale, l'analyse spectrale permet de caractériser le filtre qu'il constitue (fig. 1).

On peut alors déduire l'image à partir de l'objet et de la réponse impulsionnelle $h(x,y)$ du filtre (ainsi appelée, car elle correspond à la réponse du filtre à un dirac) par une simple convolution. Le principe de notre étude est donc de considérer le brouillard comme un filtre optique, afin de pouvoir le caractériser, soit dans le domaine spatial par sa réponse impulsionnelle, soit dans le domaine fréquentiel par sa fonction de transfert optique (FTO), sa fonction de transfert de modulation (FTM) ou sa fonction de transfert de contraste (FTC).

Fonction de transfert optique

Dans le cas où la lumière considérée est cohérente, on définit une réponse impulsionnelle h_c à partir de l'équation de convolution :

$$s(x_i) = e(x_i) * h_c(x_i)$$

En prenant la transformée de Fourier de la relation précédente, on a :

$$S(f_i) = E(f_i) * H_c(f_i)$$

avec $S(f_i)$, $E(f_i)$ et $H_c(f_i)$ les transformées de Fourier respectives de $s(x_i)$, $e(x_i)$ et $h_c(x_i)$.

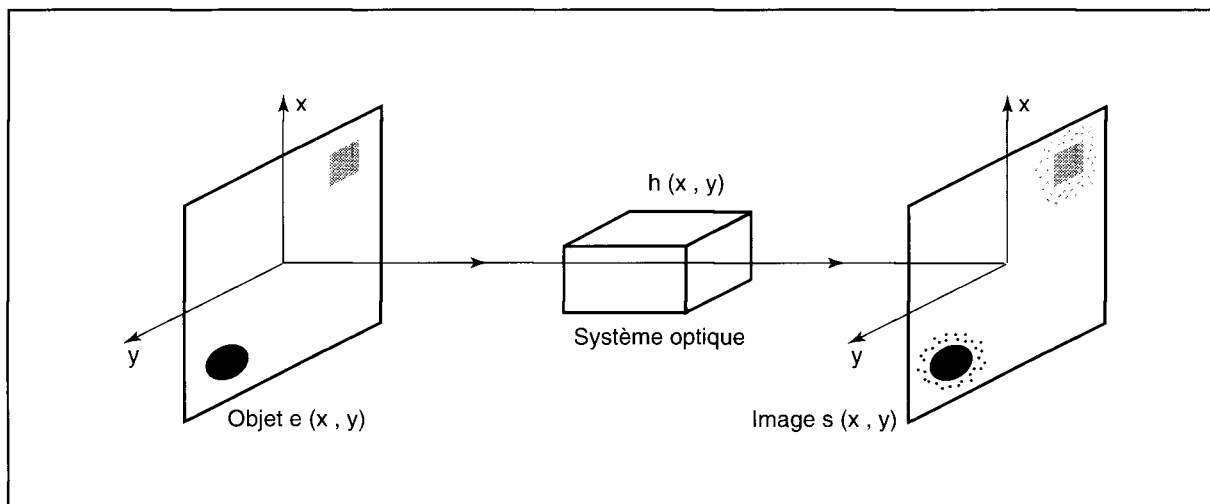


Fig. 1 - Modèle de système optique.

Il s'ensuit que :

$$H_c(f_i) = \frac{S(f_i)}{E(f_i)}$$

$H_c(f_i)$ représente la fonction de transfert cohérente. C'est la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle cohérente h_c .

Dans le cas où la lumière ne possède aucune relation de phase spatiale ou temporelle (cas général), on définit l'intensité de l'image de sortie par la relation suivante :

$$I(x_i) = |e(x_i) * h_c(x_i)|^2 = |e(x_i)|^2 * |h_c(x_i)|^2$$

Dans ces conditions la réponse impulsionnelle incohérente h_i est :

$$h_i(x_i) = |h_c(x_i)|^2$$

On définit alors la fonction de transfert incohérente, ou fonction de transfert optique (FTO) par la relation :

$$F_0(f_i) = \frac{\text{TF} \{ |h_c(x_i)|^2 \}}{\text{TF} \{ |h_c(x_i)|^2 \}_{f_i=0}} = \frac{H_i(f_i)}{H_i(0)}$$

où $H_i(f_i)$ est la transformée de Fourier (TF) de $h_i(x_i)$.

Fonction de transfert de modulation

La FTO est une valeur complexe qui peut se mettre sous la forme :

$$F_0 = |F_0| \cdot e^{i.F_p}$$

où $|F_0|$ est le module de la FTO, et F_p la phase de la FTO.

On définit alors la fonction de transfert de modulation (FTM) comme le module de la FTO.

La FTM est définie, selon le principe même de la transformée de Fourier, par le comportement du filtre pour un signal sinusoïdal : l'effet de ce filtre se résumera à la seule modification de l'amplitude et de la phase de ce signal, sans en affecter la forme. La mesure de la FTM doit donc se faire en mesurant le contraste de signaux dont la luminance varie sinusoïdalement en fonction de la distance. Dans la pratique, la conception de mires sinusoïdales est relativement délicate. On peut alors utiliser des mires à signaux carrés, plus faciles à réaliser. Toutefois, la composition spectrale de ces signaux étant complexe, on obtient dans un premier temps une fonction de transfert du contraste (FTC), qu'il est possible de corriger ultérieurement pour déterminer la FTM [6].

Fonction de transfert de contraste

D'un point de vue général, le contraste est défini comme la différence entre les intensités maximale et minimale rapportées à une valeur de référence.

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{réf}}}$$

C'est la valeur de $I_{\text{réf}}$ qui donne diverses définitions de C , selon qu'on choisit I_{\min} , I_{\max} ou $I_{\max} + I_{\min}$. Dans le cas des systèmes convertissant le signal optique en signal électrique, c'est souvent cette dernière référence qui est utilisée. Le contraste est alors également appelé modulation.

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

Pour déterminer la fonction de transfert de contraste (FTC), on fait le rapport des contrastes en entrée $C_e(f)$ et en sortie $C_s(f)$ du filtre, en fonction des fréquences spatiales.

$$F_c(f) = \frac{C_s(f)}{C_e(f)} \quad (2)$$

Hypothèses de travail

Cette tentative de caractérisation du brouillard en tant que filtre optique nous amène à formuler un certain nombre d'hypothèses. On suppose d'abord que la chaîne « image-brouillard-récepteur » peut être modélisée par un système optique bidimensionnel constituant un filtre linéaire et invariant. La propriété d'invariance spatiale est peu probable, étant donnée l'hétérogénéité du brouillard naturel, mais constitue une approximation acceptable à l'échelle concernée. De plus, pour simplifier la méthodologie de mesure, on considère également, *a priori*, que la réponse du filtre est isotrope. Il s'ensuit que la réponse impulsionnelle est symétrique de révolution ; dans ces conditions, la caractérisation de la transmission dans le brouillard peut être monodimensionnelle.

Mise en œuvre de l'analyse fréquentielle du brouillard

Mise en œuvre expérimentale

Le dispositif général de mesure est illustré sur la figure 2. L'expérimentation consiste à mesurer la FTC du brouillard en utilisant une mire à signaux carrés possédant des caractéristiques permettant d'échantillonner correctement le spectre des fréquences spatiales visibles. L'information est recueillie sur une caméra CCD linéaire connectée à un micro-ordinateur. Le brouillard est produit dans la chambre de brouillard du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand.

Fig. 2 -
Dispositif général
de mesure de la fonc-
tion de transfert de
contraste.

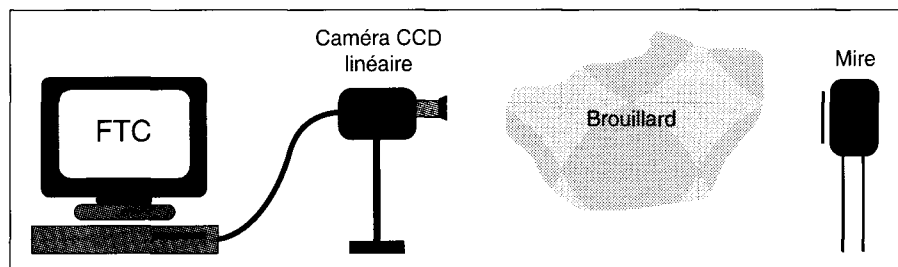
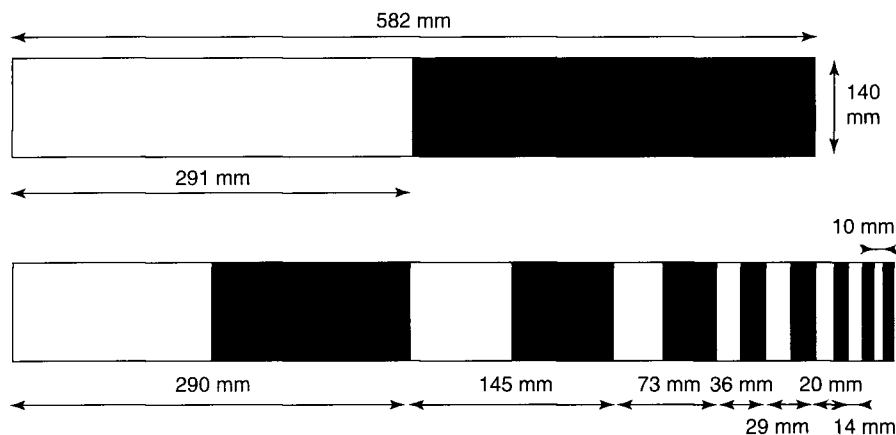


Fig. 3 -
Géométrie de mire
fournissant à 17 m,
un échantillonnage de
9 fréquences spatiales
entre 0,5 et 30 cpd.



Description de la mire

On définit la fréquence spatiale des mires en cycles par degrés (cpd), afin de pouvoir réaliser des essais pour plusieurs distances mire - caméra.

Pour permettre une acquisition correcte de la luminosité de la mire sur la caméra CCD, il convient de prendre en compte plusieurs paramètres :

- distance mire - caméra,
- distance focale de l'objectif,
- dimension des pixels de la caméra pour garantir un échantillonnage spatial satisfaisant les conditions de Shannon,
- dynamique du système d'acquisition.

Un exemple de mire est donné (fig. 3) permettant d'échantillonner en neuf points la gamme des fréquences spatiales, de 0,5 à 30 cpd, perceptibles par l'œil. Cette mire est valable pour une distance d'observation de 17 mètres. Cette géométrie et le type de mire nous permettent, en particulier, de reprendre l'expérimentation décrite dans l'article de Naoyoshi Nameda [7], qui fournit des résultats qui ne correspondent pas à ceux qui avaient été observés dans des expériences antérieures [1], [2]. Nous donnons dans le tableau I les caractéristiques permettant la réalisation de la mire donnée sur la figure 3.

TABLEAU I
Dimensions et fréquences spatiales de la mire
(fig. 3), pour une distance mire-caméra de 17 m et
une distance focale de l'objectif de 0,3 m

Fso (cpd)	Fsi (m ⁻¹)	h' = 1/Fsi (μm)	Fso (m ⁻¹)	h = 1/Fso (mm)
0,50	93,90	10 650	1,72	582
1	188,40	5 306	3,45	290
2	376,90	2 653	6,90	145
4	748,60	1 336	13,70	73
8,09	1518	659	27,78	36
10,05	1884	531	34,48	29
14,57	2732	366	50	20
20,81	3903	256	71,43	14
29,14	5465	183	100	10

Fso : fréquence spatiale de la mire (en cpd)
Fsi : fréquence spatiale de l'image sur le chip CCD de la caméra (en m⁻¹).
h' : période spatiale de l'image sur le CCD (μm).
Fso : fréquence spatiale de la mire (en m⁻¹).
h : période spatiale de la mire (en mm).

D'un point de vue pratique, cette mire est constituée par des films transparents de densité optique variable. Pour satisfaire aux conditions optimales de la dynamique du système de mesure, on a choisi

une densité optique de 0,1 pour les parties claires de la mire et une densité optique de 0,7 pour les parties sombres. Cette mire est placée devant une surface lumineuse, constituant ainsi une source primaire qui est observée par la caméra.

Système d'acquisition

Ce système est réalisé par une caméra CCD linéaire munie d'un objectif de distance focale de 300 mm pour garantir un échantillonnage spatial convenable au niveau des fréquences spatiales élevées. De plus, dans un certain nombre d'acquisitions, la réponse spectrale de la caméra a été corrigée afin d'être adaptée au mieux au spectre visible.

Un micro-ordinateur recueille les informations de la ligne vidéo et permet tous les traitements ultérieurs de sélection, moyennage, etc. L'ensemble a été étalonné afin de permettre de déterminer la relation existant entre le niveau de gris obtenu en sortie de la caméra et la luminance de l'image observée.

Salle de brouillard

La salle de brouillard du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand produit un aérosol artificiel en injectant de l'eau sous pression dans des buses, par l'intermédiaire de rampes placées au plafond de la salle. L'eau s'échappe alors de ces buses sous la forme de micro-gouttelettes [8].

Un transmissiomètre, constitué d'un récepteur et d'un émetteur placés à 1,2 m de hauteur, permet de mesurer le coefficient d'extinction en temps réel. On en déduit la distance de visibilité à partir de la loi d'atténuation du contraste de Koshmieder :

$$C = C_0 \cdot e^{-k \cdot D}$$

avec :

- C_0 : contraste intrinsèque de la cible,
- C : contraste perçu par l'observateur,
- k : coefficient d'extinction du milieu,
- D : distance entre la cible et l'observateur.

La distance de visibilité V correspond à la distance pour laquelle un seuil de contraste arbitraire ε de 5 % est atteint :

$$\varepsilon = e^{-k \cdot V}$$

soit :

$$V = \frac{1}{k} \cdot \ln \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) \cong \frac{3}{k}$$

Dans notre expérimentation, ce paramètre conventionnel a été choisi pour caractériser le brouillard.

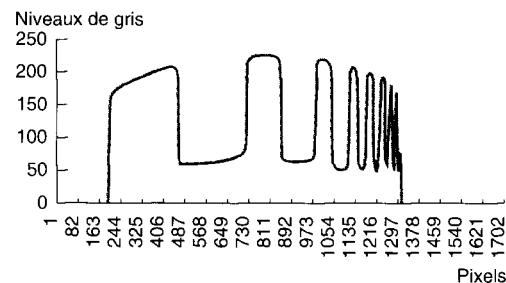
Procédure des mesures

La procédure d'acquisition se déroule en deux temps :

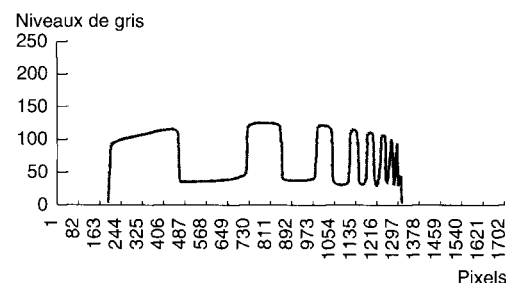
- une mesure du contraste C_{sb} sans brouillard,
- une mesure du contraste C_{ab} avec brouillard.

La mesure du contraste sans brouillard s'effectue en l'absence totale de brouillard. Elle permet de caractériser complètement les conditions particulières liées à l'éclairage de la mire, aux conditions de prises de vue, etc. Elle consiste à acquérir un certain nombre de profils de luminance pour en effectuer une moyenne qui servira de référence pour la suite. La figure 4 donne un exemple de profil obtenu avec la caméra CCD linéaire.

Fig. 4 - Exemples de profil obtenu sur une mire



a. lors d'une acquisition sans brouillard.



b. lors d'une acquisition avec brouillard.

On constate une déformation de l'amplitude des signaux en raison de l'hétérogénéité de l'éclairage de la mire. Cependant, cette déformation disparaît lorsqu'on calcule le rapport entre ces deux signaux.

Pour effectuer les mesures avec brouillard pour plusieurs valeurs de visibilité et compte tenu de l'augmentation permanente de la distance de visibilité après arrêt de l'alimentation en eau, la procédure suivante a été adoptée :

- mise en saturation, puis arrêt de formation de brouillard,
- observation de la distance de visibilité en temps réel jusqu'à la valeur choisie,
- acquisition d'une « salve » de cinq profils et moyennage des résultats.

Les deux dernières phases sont répétées pour les diverses valeurs de visibilité choisies. Nous donnons sur la figure 4b, à titre d'exemple, le résultat d'un profil obtenu avec présence du brouillard. Précisons que les amplitudes relevées ne peuvent pas directement être comparées à celles obtenues avec l'essai sans brouillard de la figure 4a, sachant que le gain de la caméra est ajusté, afin d'obtenir la meilleure dynamique possible pour chaque série d'acquisitions.

Résultats obtenus

Diverses séries de mesures ont été réalisées. Nous donnons ci-après un exemple représentatif de l'ensemble des résultats obtenus. Le tableau II et la figure 5 donnent les résultats de la FTC obtenue pour quatre distances de visibilité : 12, 18, 22 et 37 mètres, pour une distance mire - caméra de 17 mètres.

TABLEAU II
Valeurs de la FTC pour 4 valeurs de distance de visibilité et 9 fréquences spatiales de la mire carrée observée à 17 m

F.S. (cpd)	V = 12 m	V = 18 m	V = 22 m	V = 37 m
0,5	1,11	1,08	1,09	1,05
1	1,06	0,99	1,03	1
2	1,02	0,98	1,02	0,97
4	1,06	1	1,04	1
8	1,07	0,99	1,03	1
10	1,07	0,99	1,03	1
14,6	1,08	0,99	1,04	0,99
20,8	1,07	0,97	1,03	0,96
29,1	1,10	0,96	1,06	0,98

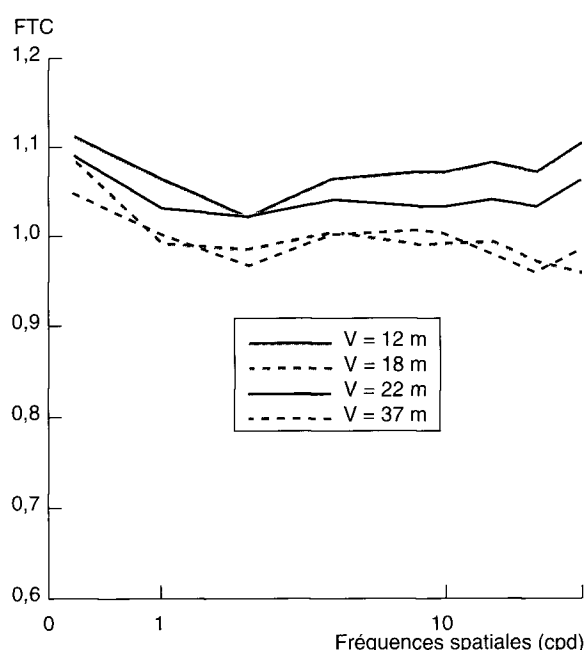


Fig. 5 - FTC obtenue pour 4 valeurs de visibilité et pour une distance mire-caméra de 17 m.

Nous constatons qu'à la précision des mesures près, la courbe de la FTC peut être considérée comme « plate » sur toute l'étendue du spectre. On peut donc dire, que dans les conditions de l'expérience, aucune modification significative du contraste en fonction des fréquences spatiales n'est observée. Ce résultat confirmé par de nombreuses autres expérimentations indépendantes ne semble pas en accord avec certaines expériences données dans la littérature. En particulier, dans [7], les courbes du contraste décroissent de façon très significative dans la gamme des fréquences spatiales comprises entre 0,1 et 10 cycles par degrés.

Mise en œuvre théorique

Pour tenter de clarifier le désaccord, on a mis au point une approche théorique, par simulation, dans laquelle le calcul remplace la mesure. Nous avons donc tenté de modéliser au mieux le système expérimental. Celui-ci est constitué de trois éléments principaux :

- la source primaire (les mires carrées),
- le milieu diffusant (le brouillard),
- le capteur (la caméra CCD). Il a donc fallu proposer un modèle pour chacun de ces éléments, parmi lesquels le brouillard est le plus complexe.

Méthode de Monte-Carlo

Un code numérique décrivant l'interaction entre la lumière et un milieu diffusant a été développé à l'INSA de Rouen à l'occasion de la thèse de J.P. Briton [9]. Il s'agit du code MUSCAT (pour Multiple SCATtering). Il utilise une technique de Monte-Carlo pour simuler numériquement la diffusion multiple d'un rayonnement électromagnétique dans une géométrie tridimensionnelle quelconque, à partir des hypothèses suivantes : système stable, pas de changement de longueur d'onde, et lumière incohérente. Le milieu est décrit comme un ensemble de volumes élémentaires homogènes et isotropes. Chacun de ces volumes est caractérisé par un coefficient d'extinction k , un albédo a (transparence), et une fonction de phase $P(\theta)$ (répartition spatiale de l'énergie diffusée en fonction de l'angle θ avec la direction incidente).

Ces caractéristiques sont calculées à partir de la distribution granulométrique et de l'indice complexe de réfraction des gouttelettes qui composent les éléments du milieu diffusant, en utilisant la théorie de Lorenz-Mie. Les autres éléments de la simulation sont les obstacles, les sources et les détecteurs, tous décrits par leur localisation, leurs dimensions, et leurs caractéristiques photométriques.

L'application de la méthode de Monte-Carlo implique de décomposer la lumière émise par une source en pinceaux lumineux caractérisés par une direction et une intensité, appelées « photons » dans un but de simplification, et dont la trajectoire est construite à partir de densités de probabilité [10]. Cette approche statistique tend vers la solution exacte du phénomène physique si le nombre de photons considéré est assez grand. Le code MUSCAT est illustré sur la figure 6.

Pour les mires carrées, on a défini un modèle de source étendue. La source est décrite par ses dimensions, sa résolution et une distribution bidimensionnelle d'intensités. On utilise donc une image dont chaque pixel émet de façon parallèle, perpendiculairement au plan de la source. Dans ces conditions, modéliser un dirac revient simplement à créer un objet noir, avec un unique pixel d'intensité non nulle au centre.

Pour pouvoir mesurer des distributions d'éclairements à une distance donnée de la source, on a défini un capteur analogue à une caméra CCD. Il s'agit d'une distribution de cibles élémentaires, carrées, dont la taille est fonction des dimensions et de la résolution désirées. Ce mur de cibles est placé à une certaine distance de la source. Lorsque les photons traversent le mur, la valeur correspondant à l'élément atteint est incrémentée de 1. On obtient ainsi une carte d'iso-éclairement, qui peut être facilement utilisée pour calculer des contrastes avec ou sans brouillard. Le modèle est illustré figure 7.

Caractéristiques des éléments simulés

Les objets représentant les mires carrées (fig. 3) sont des carrés de 64 cm de côté, constitué de 256×256 pixels (sources élémentaires). Le fond est noir (intensité nulle), et les échelons clairs et foncés ont un contraste de 3/5. Les images correspondantes sont de taille et de résolution identiques, afin d'empêcher l'occultation éventuelle de certains phénomènes par intégration. En l'absence de données granulométriques sur le brouillard utilisé lors des mesures décrites précédemment, on a choisi de travailler avec deux types de microstructure, à distance de visibilité constante.

Les données utilisées proviennent de mesures effectuées dans les salles de brouillard du Laboratoire régional de Clermont-Ferrand, à plusieurs années d'intervalle. Les distributions granulométriques de chaque type de brouillard différent par leur mode (fig. 8) :

- type A : mode de distribution à 10 μm ,
- type B : mode de distribution à 1 μm .

La géométrie du système est limitée par les plans objets et images, distants de 17 m, et entre lesquels le brouillard s'étend indéfiniment. Les calculs sont effectués pour une série de valeurs de la distance de visibilité.

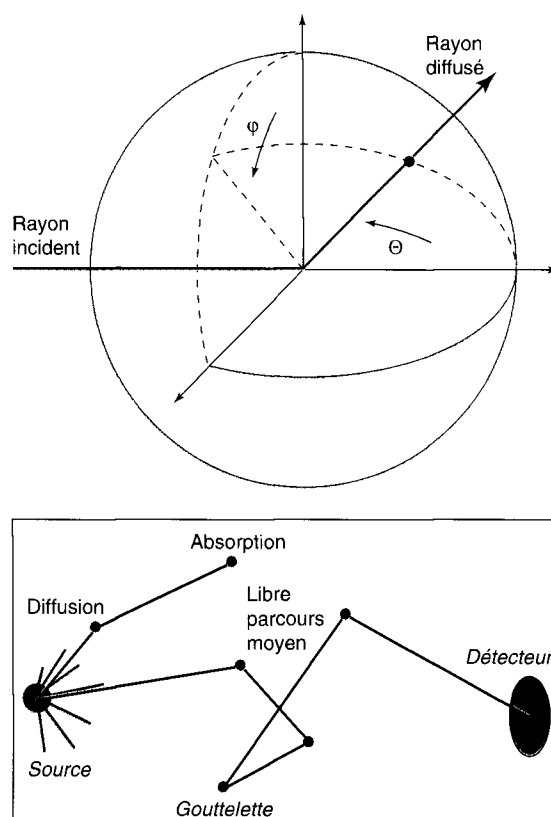


Fig. 6 - Illustration de la méthode de Monte-Carlo appliquée à la multidiffusion par un aérosol.

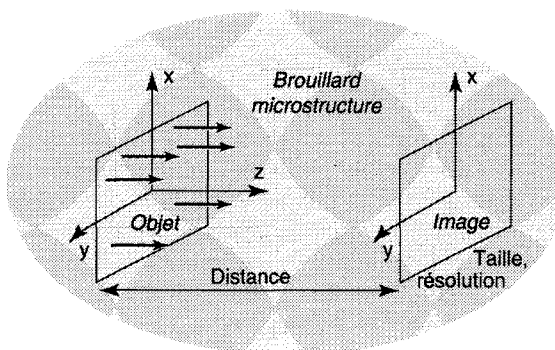


Fig. 7 - Géométrie du modèle utilisé pour la simulation.

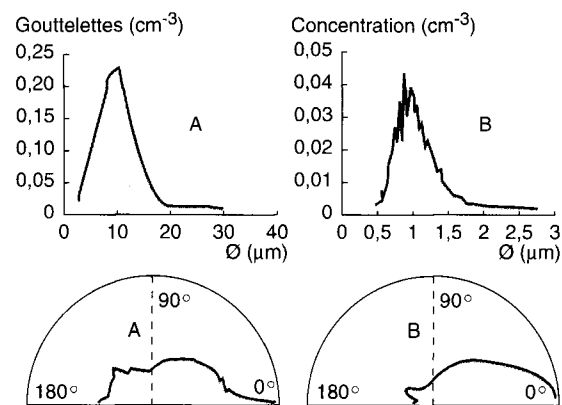


Fig. 8 - Caractéristiques des 2 types de brouillard utilisés pour la simulation (les fonctions de phase sont représentées en coordonnées polaires en échelle logarithmique).

Résultats obtenus

La figure 9 donne un aperçu des résultats de la simulation pour chaque type de brouillard. On observe un halo notable autour de la mire dans le cas du brouillard A, et des gradients d'éclairements dans la mire elle-même. Quant au brouillard B, il ne semble pas créer de halo ou de gradient perceptible, mais entraîne une plus forte réduction de l'éclairement. On trouve l'explication à ce phénomène en observant la différence entre les fonctions de phase des deux types de brouillard. Dans le cas du brouillard de type A, constitué de « grosses » gouttelettes, la diffusion vers l'avant est largement prépondérante, ce qui entraîne un maintien relatif de la cohésion du faisceau incident. Dans le cas du brouillard B, au contraire, l'énergie lumineuse est diffusée de manière plus isotrope, entraînant une dispersion plus efficace des faisceaux incidents, dont seule la partie non diffusée permet de détecter la mire, le reste créant une luminance de voile.

Les profils horizontaux d'éclairements sont extraits des images en moyennant une bande de 5 pixels au long de la mire. Ils sont représentés figure 10 pour une distance de visibilité de 20 mètres.

À partir de ces profils, on calcule les contrastes (1) pour chaque fréquence spatiale, en prenant les extrema aux centres des échelons. La FTC (2) est calculée à partir des contrastes pour chaque distance de visibilité. Les résultats sont représentés sur la figure 11.

La comparaison des courbes de FTC en fonction du type de brouillard est des plus intéressante. On observe en effet une tendance très dissemblable, comme le laissaient présager les différences observées sur la figure 9. Il semble que le brouillard de type A atténue le contraste de manière croissante avec la fréquence spatiale, même si cette tendance atteint très rapidement un palier. À l'opposé, la FTC du brouillard de type B semble être plate. Ces résultats indiquent que l'influence des fréquences spatiales sur l'atténuation du contraste par le brouillard dépend fortement de la granulométrie : les « grosses » gouttelettes atténuent plus le contraste pour les hautes fréquences, alors que les « petites » gouttelettes transmettent le contraste en l'atténuant de manière uniforme.

Comparaison des résultats

Nous avons tenté de reproduire au plus près les conditions expérimentales pour réaliser les simulations numériques. Il y a toutefois certaines différences qui n'ont pas pu être évitées. La plus importante vient sans doute de la modélisation de la mire expérimentale par une distribution de sources élémentaires à faisceaux parallèles,

comme on peut le voir en comparant les profils des figures 5 et 11. De plus, on n'a aucune information sur la microstructure du brouillard qui a été produit pour les mesures. Enfin, la simulation ne prend en compte aucun effet de bord, alors que les mesures ont été faites dans un espace clos.

Malgré l'imperfection de la modélisation, les résultats de la simulation permettent d'expliquer le fait que la FTC mesurée par le laboratoire d'Angers soit plate, alors que celle mesurée par [7] dépend fortement des fréquences spatiales. Cela tend à démontrer que la granulométrie du brouillard produit à Clermont-Ferrand correspond au type B, c'est-à-dire constitué de « petites » gouttelettes. Une étude récente [11] effectuée au laboratoire de Clermont-Ferrand apporte une confirmation à cette explication. L'aérosol artificiel utilisé par [7] était, quant à lui, constitué de particules atteignant 60 µm de diamètre, avec un mode de distribution à environ 20 µm, et la décroissance de la FTC obtenue est très marquée.

Conclusion et perspectives

La comparaison des résultats expérimentaux et théoriques, concernant la fonction de transfert de contraste du brouillard, montre l'influence de la taille des gouttelettes sur le filtrage fréquentiel du contraste. Plus le diamètre des particules est important, plus le contraste est atténué de façon croissante en fonction des fréquences spatiales. Cette propriété existe quelle que soit la distance de visibilité, ce qui montre l'insuffisance de ce dernier paramètre pour caractériser l'effet du brouillard sur la visibilité.

Les conditions de notre étude sont trop restrictives pour nous permettre d'en généraliser les résultats, en particulier pour d'autres types de sources, ou une illumination de jour. Il semble néanmoins, à l'issue de cette approche préliminaire, qu'il serait plus objectif de caractériser le brouillard comme un filtre optique, par une fonction de transfert ou une réponse impulsionnelle.

Un travail de recherche a été engagé dans ce sens dans le réseau des laboratoires des Ponts et Chaussées, avec une approche parallèle entre les mesures expérimentales et les simulations numériques. Il faudra déterminer la légitimité de notre hypothèse de travail, qui assimile le brouillard à un filtre linéaire et invariant, et les conditions à réunir pour autoriser son emploi. La mise au point d'un « opérateur de contraste » caractérisant le brouillard, et d'une méthode pour le mesurer *in situ*, permettrait de produire des simulations visuelles, voire à l'inverse d'extraire certains indices visuels par temps de brouillard pour améliorer la perception de la route.

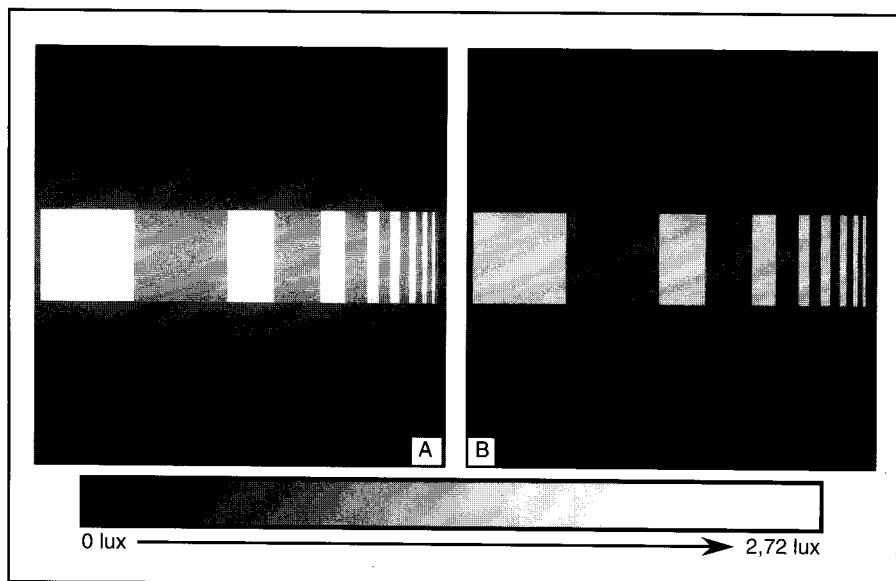


Fig. 9 -
Exemple de distribu-
tions d'éclaircements
obtenus par simulation
de la mire carrée (flux
unitaire), pour 17 m de
brouillard et 20 m de
visibilité pour 2 types
de brouillard
(A : $10 \mu m$ - B : $1 \mu m$).

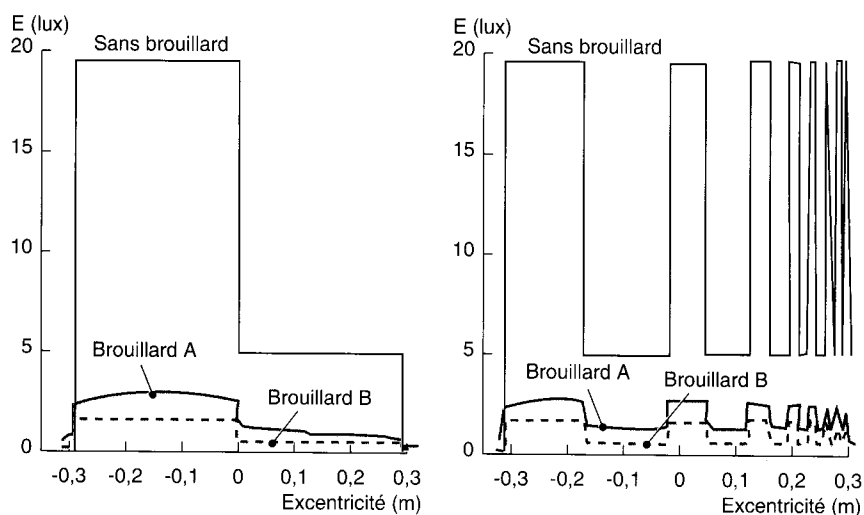


Fig. 10 -
Exemple de profils
d'éclaircements obtenus
par simulation de la
mire carrée, pour 17 m
de brouillard et 20 m
de visibilité, avec et
sans brouillard.

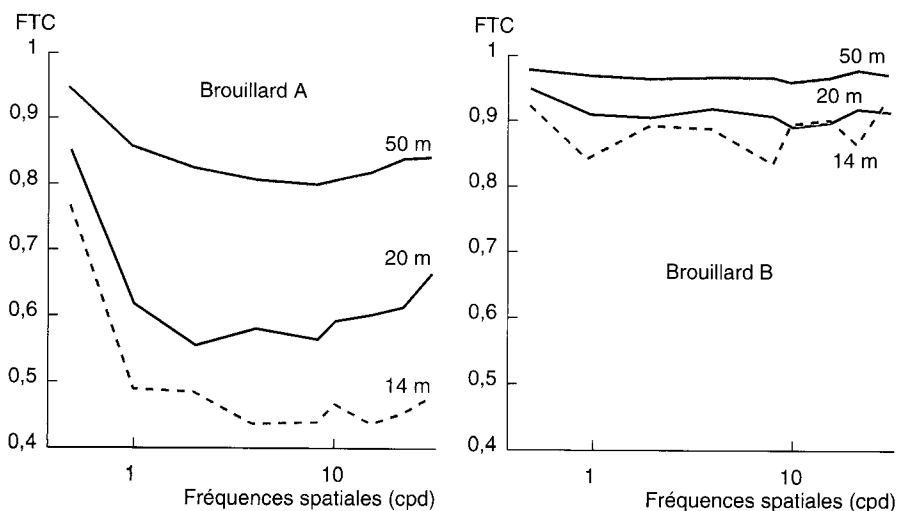


Fig. 11 -
FTC obtenue pour
2 types de brouillard et
3 distances de visibilité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ZOUBOFF V. (1991), *Étude de faisabilité sur la mesure de la fonction de transfert du brouillard* - Laboratoire des Ponts et Chaussées d'Angers - Rapport interne (FAER 1.20.09.0).
- [2] ZOUBOFF V., BOZE D. (1992), *Estimation de la fonction de transfert de modulation du brouillard* - Laboratoire des Ponts et Chaussées d'Angers - Rapport interne (FAER 1.61.02.1).
- [3] ZOUBOFF V., BOZE D. (1994), *Caractérisation du brouillard par sa fonction de transfert de contraste* - Laboratoire des Ponts et Chaussées d'Angers - Rapport interne (FAER 1.61.02.3).
- [4] DUMONT E. (1995), *La vision dans le brouillard : effets psychophysiques et techniques de simulation* - Laboratoire central des Ponts et Chaussées - Synthèse bibliographique (2.61.12.4).
- [5] KELLY D.H. (1994), *Visual science and engineering : models and applications* - Marcel Dekker, Inc. / New-York.
- [6] NIJHAWAN O.P., DATTA P.K., BUSHAN J. (1975), *On the measurement of MTF using periodic patterns of rectangular and triangular wave-form* - Nouvelle revue optique, t.6, 1, pp. 33-36.
- [7] NAMEDA N. (1992), *Fog modulation transfer function and signal lighting* - Lighting Res. Technol., 24(2), pp. 103-106.
- [8] COLOMB M. (1994), *1.2.3... Brouillard* - Laboratoire des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand - Plaquette de présentation.
- [9] BRITON J.P., MAHEU B., GREHAN G., GOUESBET G. (1992), *Monte-Carlo simulation of multiple scattering in arbitrary 3D geometry* - Part. Part. Syst. Charact., 9, pp. 52-58.
- [10] PAULMIER G., CARTA V., MAHEU B. (1996), *Un outil de simulation pour les études de visibilité dans le brouillard* - Bulletin de liaison des P. et Ch.
- [11] SEREZAT L., COLOMB M., BOREUX M. (1995), *Étude préliminaire de la granulométrie du brouillard artificiel produit dans les chambres à brouillard du LRPC de Clermont-Ferrand* - Laboratoire des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand - Rapport interne (2.61.12.4).

ABSTRACT

Visibility in fog : an approach via the contrast transfer function

E. DUMONT - V. ZOUBOFF

In order to characterize the effects of fog on road visibility in physical terms, an approach using the processing of the signal was adopted.

Considering contrast as the source of the mechanisms of the visual system, the linearity and spatial invariance of fog was assumed in order to determine the contrast transfer function.

The application of such an approach was studied experimentally by measurements made in an artificial fog, and theoretically by simulations using a Monte Carlo method.

The experimental and theoretical results were compared; the conclusions open up certain prospects of processing the signal so as to characterize the effects of fog on visibility.