

La luminance des brouillards diurnes

Élément d'altération de la visibilité

Giselle PAULMIER

Victor CARTA

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

De jour, la présence de brouillard crée un voile lumineux qui participe à la dégradation des indices visuels utilisés par l'automobiliste pour gérer sa tâche de conduite. Le niveau de luminance de ce voile dépend de nombreux paramètres. Une méthode permettant de calculer la luminance d'une couche de brouillard en fonction de sa densité optique, de la granulométrie des gouttelettes en suspension ainsi que de la position du soleil et de celle de l'observateur est décrite. Les résultats obtenus montrent que, en situation de conduite, les niveaux de luminance dans les brouillards diurnes dépendent principalement de la direction de déplacement du conducteur par rapport au soleil. Si la luminance diminue lorsque la granulométrie du brouillard augmente, l'influence de la densité optique calculée sur la hauteur de la couche de brouillard reste faible dans tous les cas, sauf face au soleil.

L'impact sur les seuils différentiels de luminance nécessaires à la détection de cibles a été abordé.

DOMAINE : Sciences de l'ingénieur.

ABSTRACT

THE LUMINANCE OF DAYTIME FOG: VISIBILITY ALTERATION FOR THE MOTORIST

During the daytime, fog creates a luminous veil that impairs the visual indices required by motorists to coordinate the driving task. The level of fog luminance depends on many parameters. In this paper, a method is first described to compute the luminance of a fog layer on the basis of its optical depth, droplet size distribution and relative position of both the sun and the motorist. Results are then analyzed and indicate that fog luminance depends to a great extent on the direction of observation with respect to the sun. While luminance decreases as droplet size distribution increases, the influence of optical depth calculated over the height of the fog layer remains small in all instances except when facing the sun.

The impact upon the differential luminance threshold for target detection is also presented.

FIELD: Engineering sciences.

Introduction

Le brouillard est un hydrométéore constitué de gouttelettes d'eau (ou de glace) maintenues en suspension dans l'air et réduisant la « visibilité* » horizontale à moins d'un kilomètre. Pour la circulation routière, les brouillards gênants correspondent à des « visibilités » inférieures à 200 mètres.

Ce phénomène naturel est redouté tant par les usagers de la route que par les responsables de la sécurité routière. Si le nombre d'accidents par temps de brouillard reste faible (à peine 1 % de l'ensemble des accidents corporels), leur gravité est plus élevée puisque le nombre de tués par rapport à l'ensemble des accidents corporels est multiplié par 1,9 [1]. Par ailleurs, ils frappent par leur caractère spectaculaire lié à l'importance du phénomène de suraccident, surtout sensible sur autoroute.

Rappelons tout d'abord qu'en situation de conduite, 90 % des informations traitées par un automobiliste sont d'ordre visuel. Ce chiffre explique l'importance que revêtent les notions de perception et de dégradation des indices visuels par le brouillard. Les études entreprises au LCPC ont permis de comprendre et de modéliser les mécanismes de dégradation des contrastes transmis par le brouillard, de jour comme de nuit [2]. De jour, la diffusion de la lumière sur les gouttelettes en suspension intervient lors des différentes étapes du processus de visibilité. Ce phénomène dégrade le contraste des objets à détecter en atténuant les luminances transmises, mais aussi en interposant un voile lumineux entre le conducteur et les différents éléments de la scène. Par ailleurs, la luminance du brouillard fixe le niveau d'adaptation du système visuel du conducteur et donc le seuil de contraste nécessaire à la détection des objets. Or, cette luminance dépend de différents paramètres, ce qui rend son évaluation difficile.

* Ce terme sera défini plus loin.

Nous rappellerons tout d'abord les conditions nécessaires à la détection d'un objet et comment elles sont modifiées par la présence du brouillard. Puis, après avoir exposé brièvement le principe de calcul du cheminement de la lumière dans un milieu diffusant, nous décrirons les paramètres à prendre en compte et leur influence sur les niveaux de luminance de différentes couches de brouillard.

Visibilité et brouillard

Le contraste en luminance est l'indice primaire du système visuel de l'être humain. Il permet au cerveau d'en inférer des informations telles que la forme d'un objet, sa texture ou la distance à laquelle il se trouve.

La présence de brouillard atténue les luminances et donc les contrastes. De jour, le voile lumineux venant se superposer entre l'automobiliste et la scène observée participe à la dégradation des indices visuels nécessaires à la réalisation de la tâche de conduite.

Conditions nécessaires à la détection d'un objet

L'équation définissant le contraste d'un objet de luminance L se détachant sur un fond de luminance L_F s'écrit :

$$C = \frac{L - L_F}{L_F} = \frac{\Delta L_{réel}}{L_F}$$

Pour être détecté en situation de conduite, un objet doit présenter un niveau de visibilité VL suffisant c'est-à-dire que l'écart de luminance $\Delta L_{réel}$ qu'il présente doit être supérieur à une valeur seuil qui dépend des conditions d'observation :

$$VL = \frac{\Delta L_{réel}}{\Delta L_{seuil}} > 1$$

Adrian [3] a proposé une équation fondée sur les résultats de tests psycho-visuels permettant de déterminer le seuil différentiel de luminance, ΔL_{seuil} , nécessaire à la détection d'un objet :

$$\Delta L_{seuil} = k \left[\frac{\Phi^{1/2}}{\alpha} + L^{1/2} \right]^2 F_{cp} F_a F_t$$

Les fonctions $\Phi^{1/2}$ et $L^{1/2}$ ne dépendent que de la luminance du fond ou luminance d'adaptation du système visuel ; α est la taille angulaire de l'objet exprimée en minutes d'arc et k dépend de la probabilité de détection choisie. Les facteurs F_{cp} , F_a et F_t permettent de prendre en compte, respectivement, la polarité du contraste, l'âge de l'observateur et le temps d'exposition du stimulus.

En présence de brouillard diurne, la luminance du fond est déterminée par la luminance du brouillard. Or, plus celle-ci sera élevée, plus le seuil différentiel de luminance nécessaire à la détection des objets sera important.

Caractéristiques des brouillards naturels

Le brouillard se forme principalement par refroidissement d'une masse d'air humide. Ce refroidissement peut avoir pour origine le rayonnement nocturne (brouillards de rayonnement) ou l'arrivée d'une masse d'air chaud et humide sur un sol froid (brouillards d'advection).

Les caractéristiques des brouillards naturels présentent une grande variabilité liée à leurs conditions de formation, mais aussi à la concentration et à la nature des noyaux de condensation présents dans l'atmosphère [4].

Une couche de brouillard peut être caractérisée par sa hauteur et par la distribution granulométrique des gouttes d'eau liquide, c'est-à-dire la concentration en nombre de gouttelettes par unité de volume et par classe de diamètre. Le tableau I présente les ordres de grandeur de quelques paramètres caractérisant une couche de brouillard [4, 5, 6].

TABLEAU I
Ordre de grandeur de quelques paramètres rencontrés dans les brouillards naturels

Hauteur de la couche	qq dizaines à cent mètres	
Gouttelettes :	Diamètre Concentration	qq dixièmes à qq dizaines de μm qq dizaines à qq centaines / cm^3
Noyaux de condensation :		
	Diamètre Concentration	qq centièmes à qq dixièmes de μm qq dixièmes à qq centaines / cm^3

Propriétés optiques du brouillard

Dans un milieu contenant des particules en suspension, une partie de la lumière est transmise directement et l'autre interagit avec les particules. Lors d'une interaction avec une particule, la lumière peut être diffusée et/ou absorbée. L'énergie totale ainsi prélevée est proportionnelle à la section efficace d'extinction de la particule :

$$C_{\text{ext}} = C_{\text{sca}} + C_{\text{abs}}$$

C_{ext} , C_{sca} et C_{abs} , qui sont respectivement les sections efficaces d'extinction, de diffusion et d'absorption, peuvent être calculées par les équations de Lorenz-Mie [7]. En présence d'une gouttelette d'eau, l'absorption de la lumière visible est négligeable et la section efficace d'extinction se réduit à la section efficace de diffusion.

Ce paramètre est relié à la section géométrique de la gouttelette de rayon r par le facteur d'efficacité d'extinction Q_{ext} (ou de diffusion Q_{sca}) :

$$C_{\text{ext}} = Q_{\text{ext}} \pi r^2$$

Lors de la diffusion, la répartition spatiale de la lumière dépend également de la taille de la particule, de sa nature et de la longueur d'onde de la lumière. Le diagramme de diffusion ou, dans sa forme normalisée, la fonction de phase de la particule est également déterminé par les équations de Lorenz-Mie [7].

Dans un milieu polydispersé, tels que le sont les brouillards naturels, un grand nombre d'interactions sont susceptibles de se produire entre la lumière et les gouttelettes en suspension. Dans ce cas, la fonction de phase et le coefficient d'extinction du milieu tiennent compte des fractions granulométriques de la distribution. Ce dernier est calculé par :

$$K = \sum_i C_{\text{ext}_i} n_i = \pi \sum_i Q_{\text{ext}_i} n_i r_i^2$$

n_i représente la concentration des différentes classes de rayon r_i . Q_{ext_i} et C_{ext_i} sont respectivement le facteur et la section efficace d'extinction de ces mêmes classes.

Lorsqu'un flux lumineux incident Φ_0 traverse un tel milieu, le flux Φ_T , transmis à une distance d , est déterminé par la loi de Beer-Lambert :

$$\Phi_T = \Phi_0 e^{-Kd} = \Phi_0 T$$

Le produit Kd représente la densité optique du milieu traversé et T son facteur de transmission. K , coefficient d'extinction du milieu, représente également la densité optique par unité d'épaisseur traversée. Lorsque la densité optique croît, par allongement des distances ou par augmentation du nombre de particules diffusantes, le phénomène de diffusion multiple apparaît. Le coefficient d'extinction, qui est un paramètre global, ne prend pas en compte ce phénomène.

Atténuation des luminances

L'atténuation des luminances par l'atmosphère a été étudiée par Koschmieder [d'après 8], qui a établi une équation reliant la luminance L d'un objet situé à une distance d à la luminance L_0 de ce même objet vu de près :

$$L = L_0 e^{-Kd} + (1 - e^{-Kd}) L_b$$

Cette expression montre que la luminance de l'objet subit à travers le brouillard une atténuation en e^{-Kd} (loi de Beer-Lambert). Elle montre également un apport de luminance de la forme $(1 - e^{-Kd}) L_b$ dû au voile lumineux présent entre l'objet et l'observateur. L_b est la luminance du brouillard mesurée à l'infini.

Aspects visuels du brouillard

L'équation précédente peut s'écrire :

$$L - L_b = (L_0 - L_b) e^{-Kd}$$

À partir de cette équation et de l'expression du contraste, Duntley a élaboré la théorie d'atténuation des contrastes [d'après 8]. Ainsi, un objet proche présentant un contraste C_0 avec le fond sera perçu, à la distance d , avec le contraste :

$$C = C_0 e^{-Kd}$$

Cette expression est à la base de la définition d'une grandeur conventionnelle appelée « Visibilité météorologique » (V_M) qui est la « distance à laquelle on peut distinguer un objet noir ($C_0 = 1$) de dimensions convenables sur un fond de ciel, le contraste seuil étant fixé à 5 % » [9]. Cette définition aboutit à l'expression :

$$V_M = -\frac{1}{K} \ln 0,05 \approx \frac{3}{K}$$

La visibilité météorologique ou visibilité horizontale est donc une grandeur conventionnelle permettant de caractériser l'opacité d'une couche de brouillard.

Simulation numérique du phénomène de diffusion

L'intérêt de connaître la luminance générée dans les brouillards diurnes est double. D'une part, elle fixe le niveau d'adaptation du système visuel du conducteur, et, d'autre part, elle permet de calculer la luminance du voile venant s'interposer entre lui et les objets présents dans son champ visuel. Or, l'évaluation de cette luminance est difficile car elle dépend de nombreux paramètres liés aux caractéristiques de la couche de brouillard, mais aussi de la position du soleil ou de la direction de déplacement du conducteur. L'objectif est donc de déterminer, par simulation, les niveaux de luminance rencontrés dans les brouillards diurnes en fonction de ces différents paramètres.

Méthode utilisée

La méthode utilisée pour calculer la luminance des brouillards diurnes met en œuvre un code de semi-Monte Carlo*. Cette technique permet de simuler la diffusion multiple par une succession de diffusions simples dans une géométrie 3D quelconque. Pour ce faire, la lumière émise par la source est découpée en un nombre fini, mais suffisamment grand, de pinceaux lumineux caractérisés par une direction et une intensité. Par souci de clarté, ces pinceaux sont appelés « photons ».

Les trajectoires sont déterminées par une succession de tirages de variables aléatoires, selon des fonctions de densité de probabilité en accord avec les différents événements rythmant la vie du photon. Sa direction initiale est déduite de l'indicatrice d'émission de la source. La distance parcourue avant une collision avec une gouttelette dépend du coefficient d'extinction du milieu. Lors de chaque diffusion, la fonction de phase définit la nouvelle direction du photon ; une composante déterministe, elle-même en accord avec les propriétés optiques du milieu, est ajoutée pour calculer la contribution directe vers le détecteur.

Plusieurs détecteurs peuvent être positionnés dans le milieu. Ils comptabilisent les contributions relatives à chaque diffusion, de la totalité des photons « lancés ». La somme de ces contributions permet de calculer le flux total, et donc l'éclairement ou la luminance, reçu par chaque détecteur. Après optimisation du nombre total de photons lancés, les résultats peuvent fluctuer d'environ 10 %, selon l'initialisation de l'algorithme utilisé pour les tirages pseudo-aléatoires.

* Le code de calcul a été développé au Laboratoire d'Énergétique des Systèmes et Procédés de l'INSA de Rouen.

Paramètres géométriques du domaine d'étude

Les luminances calculées doivent être indépendantes des dimensions horizontales du volume d'étude, mais ces dernières doivent être minimisées afin de limiter les temps de calcul.

Après quelques tests préliminaires, on a sélectionné un parallélépipède de section horizontale carrée de 1 km de côté. Les quatre faces verticales sont absorbantes de sorte que, lorsque la trajectoire d'un photon traverse une interface, celui-ci soit perdu comme s'il sortait de la couche de brouillard.

La hauteur du parallélépipède représente la hauteur de la couche de brouillard. La face inférieure, qui matérialise le sol, est considérée comme absorbante. La face supérieure est, par hypothèse, occupée par la source de lumière.

Un détecteur, posé sur le sol au centre de la base du volume, permet de contrôler l'éclairement horizontal. L'angle d'ouverture de ce détecteur est de ± 90 degrés autour de la normale. Plusieurs détecteurs sont positionnés à la verticale de ce point, à 1,20 mètres du sol. Ils simulent des conducteurs de véhicules légers en position de conduite. La face collectant les photons est verticale et orientée selon différents angles par rapport à la direction du soleil. Les angles ($0, 45, 90, 135$ et 180 degrés) sont mesurés entre la normale à cette face, d'une part, et le plan vertical passant par le soleil et le centre commun aux 5 détecteurs, d'autre part. L'angle d'ouverture des « détecteurs-conducteurs » est fixé à ± 10 degrés autour de la normale, ce qui correspond à l'angle généralement adopté pour mesurer la luminance d'adaptation du système visuel.

Description de la source

La situation modélisée est celle d'un ciel clair au-dessus de la couche de brouillard. La source est donc constituée du soleil et du ciel diffus.

On choisit tout d'abord un lieu, un jour et une heure, afin de calculer la position du soleil puis on utilise le modèle « CIE standard clear sky » [10], dans lequel le ciel est défini comme une calotte hémisphérique. Les équations de ce modèle permettent de calculer la contribution diffuse du soleil en chaque point P quelconque du ciel, repéré par ses coordonnées en site et en azimut (fig. 1a) ainsi que la contribution directe du soleil. Ces résultats sont stockés dans un fichier qui donne, par intervalle angulaire de 5 degrés, le flux correspondant à chaque direction d'émission (fig. 1b).

Ce fichier représente l'indicatrice d'émission de la source. Un nombre de photons, proportionnel au flux élémentaire ainsi calculé, est lancé dans chaque direction. Leurs coordonnées de départ sont tirées au sort de manière équiprobable à l'intérieur des dimensions de la face supérieure du volume d'étude.

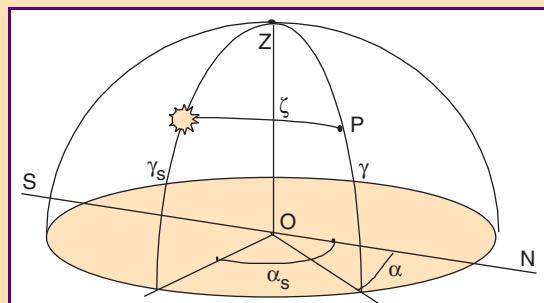


Fig. 1a - Illustration du repère utilisé par le modèle « CIE standard clear sky ».

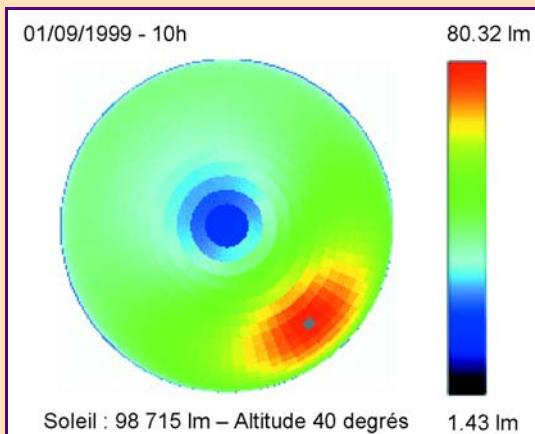


Fig. 1b - Exemple de flux calculé pour une position particulière du soleil.

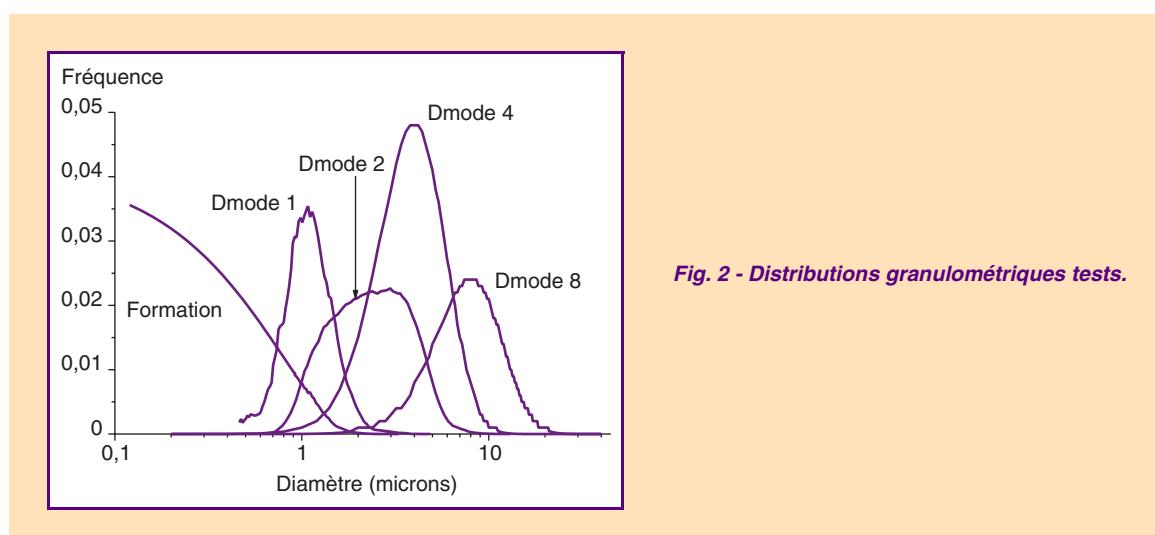
Caractérisation du brouillard

Dans les simulations, le brouillard est supposé homogène et isotrope. Les distributions granulométriques ont été choisies afin de représenter au mieux la variabilité rencontrée dans les brouillards naturels [11]. Les diamètres modaux s'échelonnent de 1 à 8 microns (fig. 2). La courbe « Formation » est une extrapolation destinée à étudier l'influence de la présence de très petites gouttes présentes dans les brouillards lors de leur formation ou de leur dissipation.

Un premier module permet de calculer les valeurs moyennes de la fonction de phase et de la section efficace d'extinction C_{ext} associées à ces cinq distributions granulométriques types. Le coefficient d'extinction K_{ext} , qualifiant l'opacité du brouillard, est défini en fixant à N la concentration en nombre de gouttes par m^3 :

$$K_{\text{ext}} = N C_{\text{ext}}$$

Dans la suite, l'opacité du brouillard sera exprimée par la visibilité météorologique. On limitera l'étude aux brouillards gênants pour la circulation routière, c'est-à-dire présentant une visibilité météorologique comprise entre 50 et 200 mètres.



Étude du niveau de luminance de voile dans les brouillards diurnes

L'objectif est d'analyser l'influence de différents paramètres sur les niveaux de luminance calculés dans les brouillards diurnes. On évaluera tout d'abord l'effet de l'altitude du soleil au-dessus de l'horizon ainsi que celui de la direction de déplacement du conducteur. Puis on étudiera l'ensemble des paramètres caractérisant une couche de brouillard, c'est-à-dire sa hauteur, son opacité et la granulométrie des gouttelettes. La région choisie pour cette étude est celle de Rouen.

Influence de l'altitude du soleil

Des dates et des heures, compatibles avec une possibilité d'occurrence de brouillard, ont été sélectionnées afin de faire varier l'altitude du soleil au-dessus de l'horizon de 10 à 40 degrés, par pas de 5 degrés. La figure 3a présente, en fonction de ces altitudes, le flux total émis par le ciel et le soleil direct. La figure 3b illustre l'évolution, proportionnelle à ces flux, des éclairements horizontaux induits au niveau du sol à travers une couche de brouillard de type « Dmode1 » de 50 mètres de hauteur, pour trois valeurs de visibilité météorologique.

La luminance du brouillard, produite par diffusion de la lumière sur les gouttelettes, dépend du flux incident et donc de l'altitude du soleil. Les résultats obtenus pour des couches de brouillard identiques à celles de la figure 3b sont présentés, pour un conducteur se déplaçant face au soleil (fig. 4a) et dans le sens opposé (fig. 4b).

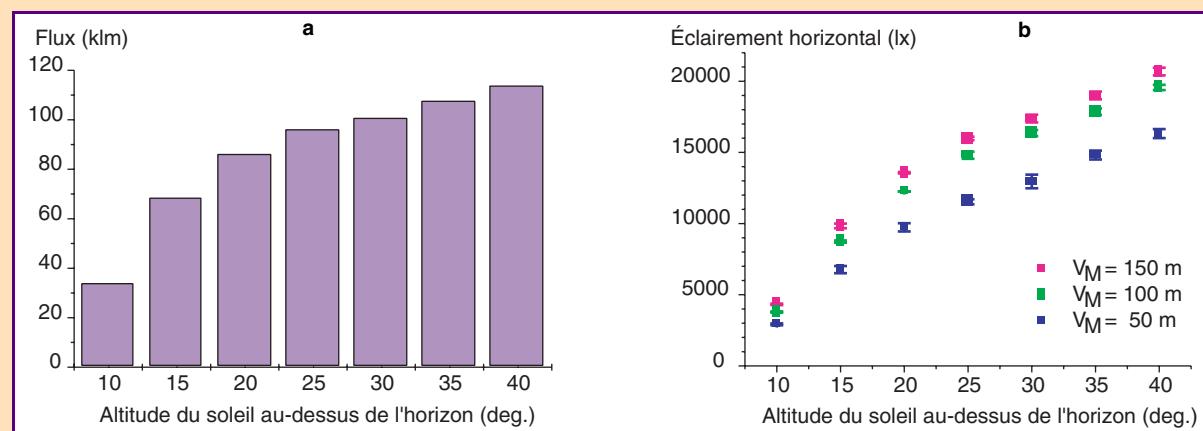


Fig.3a - Influence de l'altitude du soleil au-dessus de l'horizon sur le flux total émis par la source (ciel et soleil direct).

Fig.3b. - Sur l'éclairement horizontal calculé à travers une couche de brouillard de 50 mètres d'épaisseur.

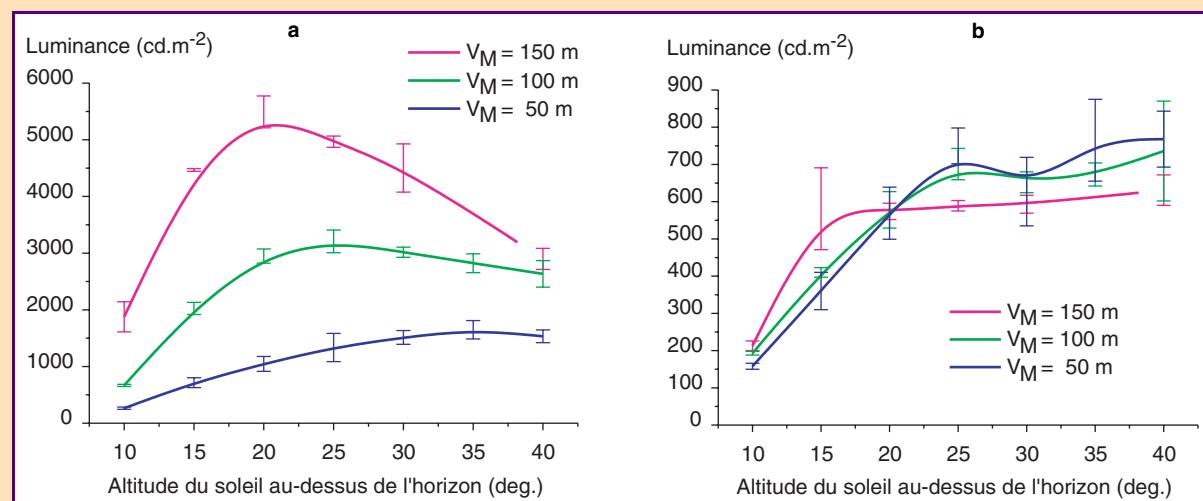


Fig. 4 - Variation de la luminance de couches de brouillard de 50 mètres de hauteur et de différentes opacités, calculée face au soleil (a) et dans la direction opposée (b), en fonction de l'altitude du soleil.

Face au soleil, on observe de fortes variations de la luminance selon l'altitude du soleil et l'opacité du brouillard. En effet, lorsque celle-ci est faible ($V_M = 150 \text{ m}$), une partie de la lumière du soleil traverse la couche de brouillard sans rencontrer de gouttelettes et, jusqu'à une certaine altitude du soleil, atteint l'automobiliste. Par contre, lorsque le soleil se trouve sur le côté ou derrière le conducteur ou que l'opacité du brouillard est importante ($V_M = 50 \text{ m}$), le phénomène de diffusion prédomine et la luminance augmente d'abord avec l'altitude du soleil puis se stabilise.

Influence de l'orientation du conducteur par rapport au soleil

On a constaté, sur la figure 4, des niveaux de luminance différents selon que le conducteur se déplace face au soleil ou à l'opposé. L'influence de la direction de déplacement du conducteur par rapport à la position du soleil a été étudiée pour des valeurs comprises entre 0 et 180 degrés, par pas de 45 degrés.

Les résultats sont présentés sur la figure 5 pour deux altitudes du soleil. La hauteur de la couche de brouillard est de 50 mètres et la granulométrie des gouttelettes est centrée sur un micron. La luminance, maximale lorsque le conducteur se déplace face au soleil, décroît rapidement pour atteindre un palier dès que le soleil se situe de côté. L'amplitude de variation de la luminance dépend de l'opa-

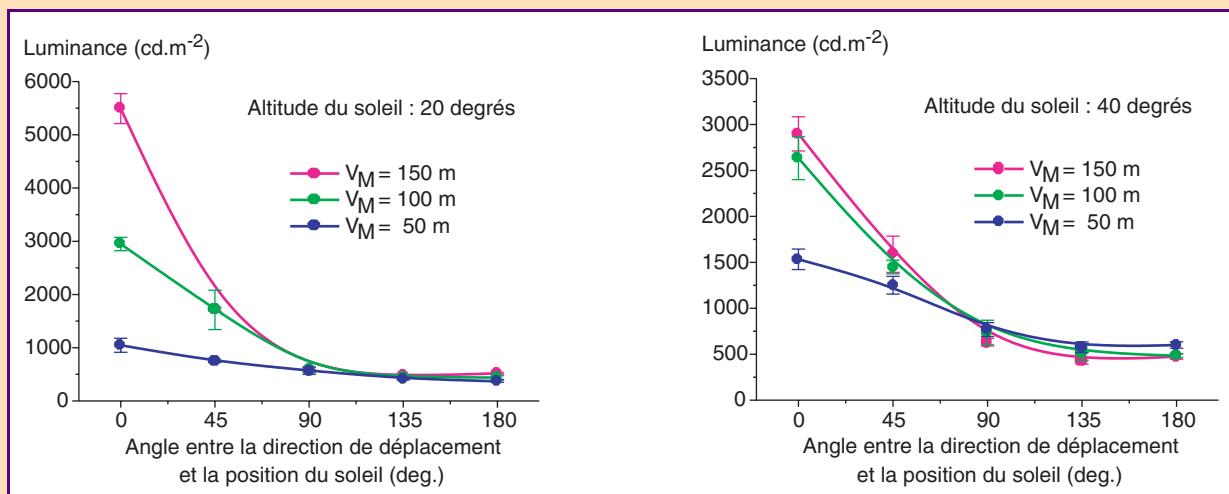


Fig. 5 - Variation de luminance due à la direction de déplacement du conducteur par rapport à la position du soleil, pour deux altitudes de celui-ci.

cité du brouillard et de l'altitude du soleil. Elle se situe entre 2 et 3 dans les brouillards denses ($V_M = 50 \text{ m}$) et de 6 à plus de 10, selon l'altitude du soleil, lorsque la visibilité météorologique atteint 150 m. Dans tous les cas, pour cette granulométrie de brouillard, le niveau du palier reste de l'ordre de 500 cd.m^{-2} .

Influence de la distribution granulométrique

La taille des gouttelettes agit directement sur le phénomène de diffusion et donc sur le niveau de luminance du brouillard. Les tests ont été réalisés pour une altitude du soleil de 40 degrés au-dessus de l'horizon et ont porté sur les cinq distributions granulométriques illustrées sur la figure 2.

La figure 6 présente les résultats obtenus pour une couche de brouillard de 50 mètres de hauteur. Ils montrent que la luminance du brouillard est d'autant plus faible que la taille des gouttelettes augmente. Ainsi, un brouillard constitué de gouttelettes de diamètre inférieur ou égal au micron générera une luminance 3 à 6 fois plus importante qu'un brouillard constitué de gouttelettes de $2 \mu\text{m}$ ou plus. On peut également noter que, lorsque le phénomène de diffusion est prépondérant, c'est-à-dire dans les directions différentes de celle du soleil, la présence de gouttelettes de diamètre inférieur au micron n'influence pas le niveau de luminance.

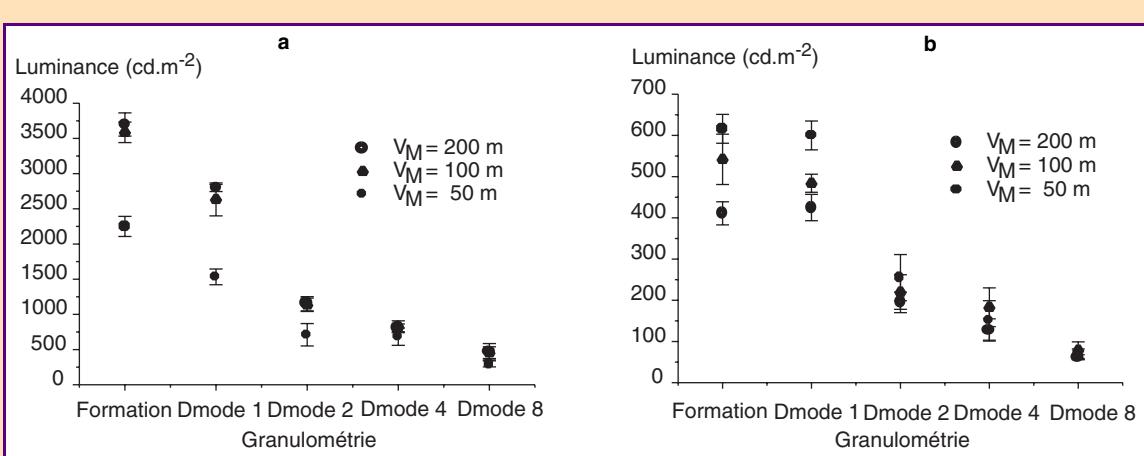


Fig. 6 - Influence de la granulométrie des gouttelettes sur la luminance du brouillard lorsque le conducteur se déplace face au soleil (a) ou à l'opposé (b).

Influence de la densité optique de la couche de brouillard

La transmission de la lumière dépend de la densité optique du milieu traversé. Dans le cas de la luminance générée dans les brouillards diurnes, il est possible de calculer ce paramètre sur la hauteur de la couche de brouillard et ainsi d'étudier simultanément les effets de la hauteur de la couche de brouillard h et de son coefficient d'extinction K_{ext} (ou de la visibilité météorologique V_M) :

$$D_{\text{opt}} = K_{\text{ext}} \cdot h = \frac{3h}{V_M}$$

Les simulations ont porté sur des couches de brouillard de 50 et 100 mètres de hauteur et sur différentes valeurs de visibilité météorologique comprises entre 50 et 200 mètres. Le tableau II indique les valeurs de densités optiques étudiées. Leurs valeurs extrêmes (soit 0,75 et 3) correspondent à une chute du facteur de transmission de 47 % à 5 %.

TABLEAU II

Correspondance entre la visibilité météorologique V_M , la hauteur de la couche de brouillard h et les différentes densités optiques testées

	$V_M = 200 \text{ m}$	$V_M = 150 \text{ m}$	$V_M = 100 \text{ m}$	$V_M = 75 \text{ m}$	$V_M = 50 \text{ m}$
$h = 50 \text{ m}$	0,75	1	1,5	2	3
$h = 100 \text{ m}$	1,5	2	3		

Lorsque le soleil se situe sur le côté ou derrière l'automobiliste, l'influence de la densité optique sur la luminance du brouillard est négligeable (fig. 7b). Par contre, face au soleil (fig. 7a), si la luminance décroît logiquement lorsque la densité optique de la couche de brouillard augmente, l'amplitude de cette variation est d'autant plus élevée que le soleil est bas au-dessus de l'horizon. Ainsi, cette amplitude de variation varie de 12 à 2 lorsque le soleil s'élève de 10 à 40 degrés au-dessous de l'horizon.

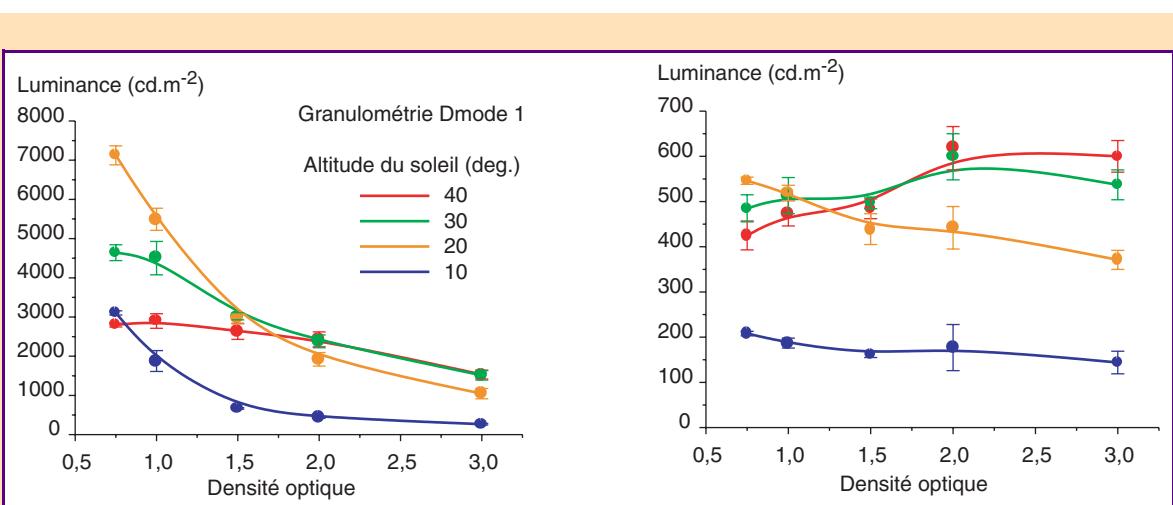


Fig. 7 - Variation de la luminance du brouillard calculée face au soleil (a) et dans la direction opposée (b), en fonction de la densité optique de la couche.

Conséquences sur les conditions de détection

En situation de conduite, c'est-à-dire pour une zone géographique et une heure données, l'altitude du soleil et la distribution granulométrique évoluent lentement. D'autres paramètres sont susceptibles de varier rapidement comme la densité optique de la couche de brouillard (le phénomène de nappe étant fréquent) et surtout la direction de déplacement du conducteur. L'une des conséquences de la variation de luminance induite par ces deux paramètres est la modification de l'état d'adapta-

tion du système visuel du conducteur et, par conséquent, du seuil différentiel de luminance nécessaire à la détection des objets présents dans son champ visuel. Les valeurs de ces seuils peuvent être déterminées grâce au modèle d'Adrian [3].

À titre d'exemple, les calculs ont été réalisés pour un automobiliste de 30 ans et un objet ayant une taille angulaire de un degré. Lorsque le soleil se trouve sur le côté ou derrière le conducteur, le seuil différentiel de luminance, comme la luminance du brouillard, varie peu. Il est généralement de 2 à 5 cd.m⁻² en présence d'une granulométrie centrée sur 1 µm et varie entre 1 et 3 cd.m⁻² lorsque le diamètre des gouttes atteint 2 µm et plus. Lorsque l'automobiliste change de direction et se trouve face au soleil, son seuil de détection peut être multiplié par 2 voire 10 selon l'altitude du soleil et la densité optique de la couche de brouillard dans laquelle il se trouve. S'il conserve sa direction de déplacement, les nappes de brouillard qu'il est susceptible de traverser entraîneront également d'importantes variations de son seuil de détection. Les ordres de grandeur des seuils différentiels de luminance, calculés dans un brouillard constitué de gouttelettes de diamètre inférieur ou égal au micron, sont résumés dans le tableau III. En présence d'un brouillard de granulométrie plus élevée, l'amplitude de variation des seuils de détection reste inférieure à 5.

TABLEAU III

Amplitudes de variation des seuils différentiels de luminance dues aux variations de densité optique de la couche de brouillard (nappes), calculées dans un brouillard constitué de gouttelettes de diamètre inférieur ou égal au micron

Altitude du soleil (deg.)	Face au soleil	Soleil de côté ou derrière
40	10 à 20 cd.m ⁻²	3 à 6 cd.m ⁻²
30	10 à 35 cd.m ⁻²	4 à 5 cd.m ⁻²
20	8 à 50 cd.m ⁻²	3 à 5 cd.m ⁻²
10	2 à 20 cd.m ⁻²	1 à 2 cd.m ⁻²

Grâce à cette première étape il sera donc possible, par exemple, d'évaluer les niveaux de visibilité de la signalisation. Mais les conséquences sur les conditions de détection de différents objets présents dans le champ visuel d'un conducteur évoluant dans le brouillard ne pourront être étudiées qu'avec des sujets mis en situation sur simulateur de conduite. Cette étape s'inscrit donc dans une démarche globale [2] visant à améliorer la qualité des images de synthèse destinées aux simulateurs.

Conclusion

De jour, en présence de brouillard, la diffusion de la lumière par les gouttelettes en suspension rend le brouillard lumineux. Cette luminance intervient dans les différentes étapes du processus de visibilité. Tout d'abord, elle constitue le niveau d'adaptation du système visuel du conducteur et fixe ainsi le seuil de contraste nécessaire à la détection des objets. De plus, en se superposant à la scène, ce voile lumineux perturbe les contrastes. La connaissance du niveau de luminance dans les brouillards diurnes est donc utile au calcul des paramètres de visibilité.

Or, le niveau de luminance des brouillards diurnes est difficile à évaluer, car il dépend de différents paramètres. Cette étude a montré qu'en situation de conduite, c'est-à-dire pour une altitude du soleil et une granulométrie données, ce niveau est fortement lié à la direction de déplacement du conducteur par rapport au soleil. Lorsque celui-ci se situe sur le côté ou derrière le conducteur, la luminance du brouillard est indépendante de la densité optique de la couche (phénomène de nappe) ; son niveau est fixé par l'altitude du soleil et la taille des gouttelettes. Si l'automobiliste change de direction et se trouve face au soleil, il percevra des luminances 2 à 10 fois plus élevées selon l'altitude du soleil et les caractéristiques (granulométrie et densité optique) de la couche de brouillard dans lequel il se trouve. Les seuils différentiels de luminance nécessaires à la détection des objets présents dans la scène visuelle du conducteur varient proportionnellement à la luminance du brouillard.

Cette étude a permis d'évaluer l'importance relative des différents paramètres sur la luminance des brouillards diurnes. Les valeurs ainsi déterminées pourront être utilisées pour améliorer le calcul de

l’atténuation des contrastes de divers objets présents dans la scène visuelle d’un conducteur. Elles pourront également trouver une application dans la modélisation des effets du brouillard sur la visibilité routière, développée au LCPC [2]. Par ailleurs, une comparaison des niveaux calculés avec des valeurs mesurées devra être réalisée en brouillard naturel, la logistique à mettre en œuvre pour une telle campagne étant nécessairement lourde.

Remerciements. *Cette étude a été financée dans le cadre d'une convention DSCR-LCPC en 1999.*

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Observatoire national interministériel de sécurité routière, *La sécurité routière en France : bilan de l'année 2000 - Notes de synthèse* - La Documentation française, **2000**.
- [2] DUMONT E., *Extending Koschmieder's law for modeling Fog Effects on Road Vision*, 16th Biennial Symposium on Visibility and Simulation, Iowa City, Iowa, États-Unis, **2002**.
- [3] ADRIAN W., *Visibility of targets: model for calculation*, Lighting Research and Technology 21, **1989**, pp. 181-188.
- [4] GUÉDALIA D., BERGOT T., *Rapports d'activité du groupement scientifique brouillard*, Météo France, **1989-1991**.
- [5] JIUSTO J.E., *Fog structure in clouds: their formation, optical properties and effects*, Academic Press, Inc., **1981**, pp. 187 – 237.
- [6] PAULMIER G., *Formation et caractéristiques microphysiques des brouillards naturels : synthèse bibliographique*, LCPC 161022, **1993**.
- [7] Van de HULST H.C., *Light scattering by small particles*, John Wiley, New York, **1957**.
- [8] MIDDLETON W.E.K., *Vision Through the Atmosphere*, University of Toronto Press, **1958**.
- [9] *International Lighting Vocabulary*, CIE publ., **17.4, 1987**.
- [10] *Spatial distribution of daylight – Luminance distributions of various reference skies*, CIE Technical Report **110, 1994**.
- [11] SHETTLE E.P., *Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties*, Report AFGL-TR-79-0214 of Air Force Geophysics Laboratory, **1979**.