

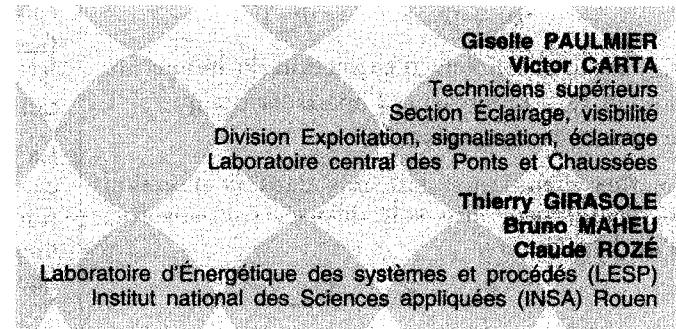
Un outil de simulation pour les études de visibilité dans le brouillard

RÉSUMÉ

Les études expérimentales dans le brouillard étant difficiles à mettre en œuvre, l'utilisation de modèles est indispensable. MUSCAT simule la diffusion multiple de la lumière dans une géométrie 3D quelconque, en utilisant un code de Monte-Carlo. Les premiers résultats indiquent que la taille des récepteurs ne peut être choisie indifféremment. Ce choix doit faire l'objet d'analyses et de simulations spécifiques, notamment si la situation étudiée impose de forts gradients lumineux au voisinage des détecteurs. La simulation d'une situation schématique de conduite a permis d'étudier la luminance de voile créée, au niveau d'un conducteur, par un projecteur de véhicule. Cette luminance dépend de la position exacte du conducteur et de la direction dans laquelle il regarde, mais également de la granulométrie du brouillard. Néanmoins, pour le type de projecteur étudié, les luminances de voile restent inférieures à $1,5 \text{ cd/m}^2$ quelle que soit la densité du brouillard.

Pour ce qui concerne les éclairements reçus à l'avant du véhicule, de grandes disparités se révèlent selon que l'on se situe au-dessus ou sous la coupure du projecteur. Ces disparités sont perceptibles dans la comparaison des éclairements obtenus par simulation avec la loi classique d'extinction de Beer-Lambert. L'influence de la distribution granulométrique du brouillard sur les niveaux d'éclairage dépend également de la position des détecteurs par rapport à la coupure.

MOTS CLÉS : 85 - Simulation - Distance de visibilité - Brouillard - Appareil de mesure - Diffusion - Lumière - Modèle numérique - Calcul - Détecteur.



Introduction

Le brouillard dense est un facteur accidentogène important. Le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées a donc engagé, depuis plusieurs années, des recherches sur la visibilité des équipements et des véhicules dans de telles conditions. Ces recherches se sont organisées autour de deux axes : l'un expérimental, s'appuyant sur les salles de brouillard du Laboratoire de Clermont-Ferrand, l'autre sur l'utilisation de modèles de calcul performants.

C'est dans cet esprit que le Laboratoire central s'est doté du logiciel MUSCAT (MULTiple SCATTERing). Ce code de calcul, élaboré par J.-P. Briton [1], s'appuie sur une technique de Monte-Carlo. Il permet de simuler la diffusion multiple de la lumière dans une géométrie 3D quelconque. Il a été validé par rapport à des travaux antérieurs, tant théoriques qu'expérimentaux [1]. La difficulté de ce dernier type de validation réside dans le degré de conformité des situations réelles et simulées.

Avant de traiter des problèmes de visibilité proprement dits, le premier objectif est d'étudier l'influence des paramètres d'entrée de MUSCAT sur les grandeurs photométriques calculées. Après un bref rappel sur les phénomènes de diffusion lumineuse, le principe de simulation du code est décrit. Puis l'influence des divers paramètres tels que l'échantillonnage des sources, la taille des récepteurs et les problèmes liés aux gradients lumineux est abordée. Enfin, l'incidence de la distribution granulométrique du brouillard est étudiée avec pour objectif de définir, si possible, un ou quelques brouillards types pour les simulations futures.

Rappel théorique sur la diffusion de la lumière

Dans un milieu contenant des particules en suspension, la lumière est diffusée et/ou absorbée par ces particules. La relation liant le flux incident Φ_0 au flux transmis Φ_T à une distance d est connue sous le nom de loi de Beer-Lambert et s'exprime par la relation :

$$\Phi_T = \Phi_0 e^{-K_{ext}d} = \Phi_0 T$$

K_{ext} est le coefficient d'extinction du milieu ; le produit $K_{ext} d$ représente l'épaisseur optique et T le facteur de transmission.

Le flux éteint (non transmis dans la direction incidente) peut être soit diffusé, soit absorbé, d'où la relation :

$$K_{ext} = K_{sca} + K_{abs}$$

K_{sca} et K_{abs} étant respectivement les coefficients de diffusion et d'absorption du milieu.

L'importance relative de la diffusion pure est mise en évidence par l'albedo de diffusion simple a , qui est le rapport entre le coefficient de diffusion K_{sca} et le coefficient d'extinction K_{ext} (diffusion plus absorption) :

$$a = \frac{K_{sca}}{K_{ext}}$$

a varie donc entre 0 (particules totalement absorbantes) et 1 (particules totalement diffusantes).

Les coefficients K_{ext} , K_{sca} et K_{abs} sont reliés à la section géométrique des particules respectivement par les facteurs d'efficacité d'extinction Q_{ext} , de diffusion Q_{sca} et d'absorption Q_{abs} par des relations de la forme :

$$K_{ext} = N Q_{ext} \pi r^2$$

N est la concentration volumique en particules de rayon r . Les facteurs d'efficacité sont déterminés à partir de la théorie de Lorenz-Mie. Ils sont sans dimension et dépendent de l'indice de réfraction (réel ou complexe) de la particule ainsi que de son paramètre de taille α :

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}$$

λ étant la longueur d'onde de la lumière dans le milieu contenant les particules diffusantes.

Dans le cas d'une gouttelette d'eau l'absorption de la lumière visible est négligeable mais, pour une goutte de $0,5 \mu\text{m}$ de rayon, l'efficacité d'extinction Q_{ext} atteint une valeur proche de 4 pour une longueur d'onde λ de 550 nm .

Le produit $Q_{ext} \pi r^2 = C_{ext}$ représente la section efficace d'extinction d'une particule de rayon r .

On définit de même les sections efficaces de diffusion C_{sca} et d'absorption C_{abs} .

L'ensemble des paramètres définis précédemment caractérisent la quantité globale de lumière diffusée. La répartition spatiale du flux diffusé possède une symétrie de révolution autour de la direction incidente. Sa distribution dans le plan d'incidence constitue le diagramme de diffusion ou fonction de phase $P(\theta)$, θ allant de 0 degré (direction incidente) à 180 degrés. Comme les facteurs d'efficacité, la fonction de phase dépend de l'indice de la particule et de son paramètre de taille.

La figure 1 présente, pour $\lambda = 550 \text{ nm}$, quelques exemples de la forme que peut prendre la fonction de phase d'une gouttelette d'eau selon son diamètre (diagramme polaire, échelle logarithmique).

Tous les paramètres décrits précédemment l'ont été pour un milieu monodispersé. Dans le cas d'une polydispersion de particules, ce qui est le cas des brouillards naturels, les définitions précédentes restent valables si la répartition spatiale des diffuseurs dans le milieu est homogène. Dans ce cas il est nécessaire de pondérer les équations précédentes par les fractions granulométriques de la distribution soit, pour le coefficient d'extinction par exemple :

$$K_{ext} = \pi \sum_i Q_{ext,i} N_i r_i^2 \quad (1)$$

$Q_{ext,i}$ est le facteur d'efficacité d'extinction d'une gouttelette de rayon r_i et N_i la concentration, en m^{-3} , de la classe r_i .

Remarque : Les travaux de Koschmieder (1923) sur l'atténuation des contrastes ont abouti à la définition de la visibilité météorologique V_m , qui permet une qualification plus interprétable du brouillard que le coefficient d'extinction. Ces deux grandeurs sont liées par :

$$V_m = \frac{3}{K_{ext}}$$

Description du code de calcul

Le code de calcul se compose de deux modules distincts, développés par le Laboratoire d'Énergétique des systèmes et procédés (LESP) de l'Institut national des Sciences appliquées de Rouen :

- NUEPHASE détermine les caractéristiques de diffusion simple décrites précédemment en s'appuyant sur la théorie de Lorenz-Mie,
- MUSCAT (multiple SCATTERing) simule la diffusion multiple à l'aide d'un code de Monte-Carlo.

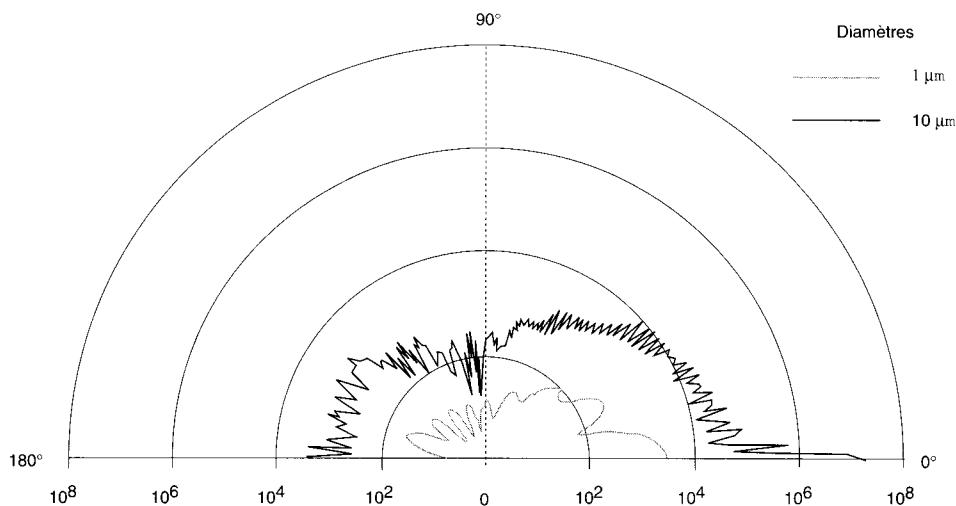


Fig. 1 - Exemples de la forme que peut prendre la fonction de phase selon le diamètre de la particule diffusante (diagramme polaire, échelle logarithmique).

Propriétés diffusantes du milieu : code NUEPHASE

Le module NUEPHASE calcule les différents paramètres définis dans les rappels théoriques sur la diffusion de la lumière, grâce aux équations établies dans la théorie de Lorenz-Mie.

Un certain nombre d'hypothèses, peu contraintes pour nos applications, sont nécessaires. Certaines concernent le milieu :

- le milieu environnant doit être transparent (indice de réfraction réel),
- les particules en suspension sont sphériques,
- leur répartition est aléatoire à l'échelle d'un élément de volume,
- le milieu diffusant est considéré comme homogène et isotrope ;

d'autres portent sur la lumière :

- à l'échelle d'une particule le faisceau lumineux est assimilé à une onde plane,
- la diffusion est quasi élastique, c'est-à-dire qu'elle ne modifie pas la longueur d'onde de la lumière,
- la diffusion de la lumière par une particule est indépendante des particules voisines.

Les conditions de circulation automobile en atmosphère perturbée satisfont à ces hypothèses hormis, dans certains cas, l'homogénéité du brouillard qu'il faudra supposer.

Les paramètres nécessaires à la réalisation des calculs sont les suivants :

- la (ou la gamme de) longueur d'onde de la lumière utilisée,

– l'indice de réfraction du milieu environnant. Dans le cas traité ici il est égal à 1 puisqu'il s'agit de l'air,

– la distribution granulométrique et l'indice de réfraction des particules en suspension. Dans cette version le brouillard est constitué de gouttelettes d'eau et les indices correspondant à des longueurs d'onde comprises entre 200 à 2 000 nm sont donnés par pas de 50 nm.

Les résultats des calculs effectués par NUEPHASE sont les valeurs moyennes des paramètres décrivant le milieu diffusant, ainsi que les fonctions de phase. Ils sont obtenus en sommant les contributions de chaque classe de la distribution granulométrique, pondérées par les fréquences.

Simulation de la diffusion multiple : code MUSCAT

Lorsqu'un milieu devient optiquement dense (allongement des distances ou augmentation du coefficient d'extinction) la probabilité pour un faisceau lumineux de rencontrer plusieurs particules au cours de son trajet augmente ; c'est le phénomène de diffusion multiple.

L'approche de J.-P. Briton [1] consiste à simuler la diffusion multiple par une succession de diffusions simples à l'aide d'une méthode de Monte-Carlo. Cette méthode, contrairement aux modèles analytiques développés précédemment, permet de prendre en compte des géométries 3D sans conditions particulières. La seule contrainte de cette approche, qui traite un problème déterministe de manière probabiliste, est d'exiger, pour conclure, un nombre suffisant d'itérations.

Principe de la simulation

L'idée centrale de MUSCAT est de découper un faisceau lumineux en un nombre limité, mais suffisamment grand, de pinceaux de lumière appelés « photons », caractérisés par une direction et une intensité. La trajectoire de chaque photon est déterminée à l'aide de fonctions de densité de probabilité liées aux différents événements de la vie du photon. Si les lois de probabilité sont en accord avec les propriétés physiques de la diffusion, la description statistique du problème tend vers la solution exacte.

La direction initiale du photon est déduite de l'indicatrice photométrique de la source. Dans chaque direction incidente un nombre de photons, proportionnel au flux émis dans l'angle solide élémentaire associé, est envoyé dans le milieu. Toutes les opérations effectuées sur les photons sont ensuite réalisées à partir de tirages aléatoires. Ces nombres, compris dans l'intervalle $[0,1]$, sont appelés r_{al} .

La probabilité de collision avec une particule, sur une distance d_1 , est donnée par le facteur de transmission $T(d_1) = e^{-Kd_1}$. $T(d_1)$ étant compris entre 0 et 1 la simulation de collision sur la distance d_1 est traitée par :

$$r_{al} \leq T(d_1) \rightarrow \text{pas de collision}$$

Dans les autres cas, il y a collision et la probabilité $p(z)dz$ que cette collision ait lieu dans l'intervalle $(z, z+dz)$ est donnée par [1] :

$$p(z)dz = K_{ext}e^{-K_{ext}z} dz$$

La simulation de la distance d parcourue par le photon avant cette collision est donnée par :

$$d = -\frac{1}{K_{ext}} \ln(r_{al}) \quad (2)$$

Lors de la collision le photon peut être soit absorbé, soit diffusé. L'albedo a ($a \in [0,1]$) représente la probabilité de l'événement « diffusion sans absorption ». La simulation de cet événement est réalisée par :

$r_{al} > a \rightarrow$ le photon est absorbé
sinon le photon est diffusé

Lorsqu'un photon est diffusé, sa nouvelle direction est caractérisée par les angles θ et Ψ . Toutes les directions $\Psi \in (0,2\pi)$ autour de la direction incidente sont équiprobables :

$$\Psi = 2\pi r_{al} \quad (3)$$

Dans le plan d'incidence, l'angle θ est donnée par la fonction de phase $P(\theta)$. Le produit $P(\theta)d\Omega(\theta)$ représente la loi de probabilité pour qu'un photon soit diffusé selon la direction θ , dans l'angle solide $d\Omega(\theta)$. La simulation numérique de θ est réalisée en résolvant l'équation :

$$r_{al} = \frac{\int_0^\theta P(\theta') d\Omega(\theta')}{\int_0^\pi P(\theta') d\Omega(\theta')} \quad (4)$$

La « vie du photon » s'arrête soit lorsqu'il sort du milieu, soit lorsqu'il est absorbé (par une particule ou par une paroi).

Paramètres d'entrée du logiciel MUSCAT

La vocation actuelle du logiciel est la simulation de situations de conduite. Les premiers paramètres à spécifier sont le type de chaussée et le type de source (primaire ou secondaire). Dans cette première approche, la chaussée est absorbante et seules les sources primaires sont utilisées.

L'ensemble des paramètres d'entrée nécessaires peuvent se scinder en deux classes : les paramètres géométriques et les paramètres physiques.

Les paramètres géométriques

Ils sont définis dans un repère orthonormé $\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$ (fig. 2). La chaussée est localisée en $X = 0$. Le conducteur est simulé par un détecteur circulaire centré, par définition, en $Y = 0$ et dont le rayon est fixé par l'utilisateur ; sa hauteur (X_C) est repérée par rapport à la chaussée. Le conducteur peut se situer dans ou à l'entrée de la zone de brouillard ($Z_C = 0$).

Le brouillard est d'étendue quasi infinie en X et en Y . Sa profondeur en Z est fixée par l'utilisateur.

La source primaire est ponctuelle et repérée par ses coordonnées (X_S, Y_S, Z_S) dans le repère principal (fig. 2).

Enfin, un certain nombre de détecteurs peuvent être disposés en différents points du volume étudié. Leur position (x_D, y_D, z_D) est repérée par rapport à la source. Ils sont actuellement de forme circulaire ; les coordonnées de leur centre ainsi que leur rayon peuvent être exprimés en mètres ou en degrés (unité à préciser) ; le changement de repère s'effectue dans le programme. Une (ou plusieurs) ouvertures angulaires peuvent être affectées à tous les détecteurs.

Les paramètres physiques

Ils concernent la source ainsi que le brouillard.

Les caractéristiques photométriques de la source sont stockées dans un fichier contenant, dans l'ordre :

- le flux total rayonné,
- les bornes angulaires, en site et en azimut, de chaque direction d'émission ainsi que le flux élémentaire associé.

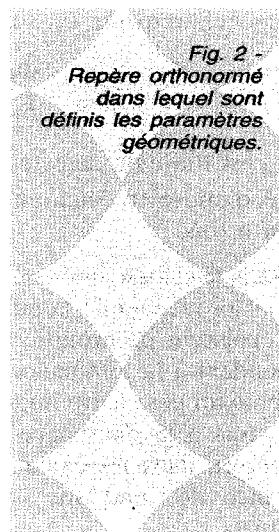
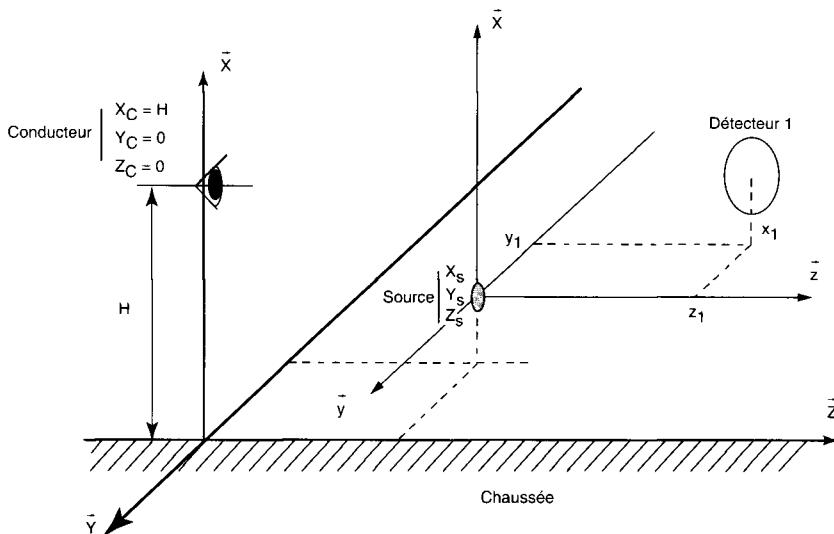


Fig. 2 - Repère orthonormé dans lequel sont définis les paramètres géométriques.

L'utilisateur précise le nombre de photons à lancer.

Pour ce qui concerne les caractéristiques du brouillard, seule la concentration par mètre cube est à préciser puisque les autres paramètres sont lus dans le fichier résultat du programme NUEPHASE décrit précédemment.

Principe de l'algorithme

Tous les paramètres d'entrée étant déterminés, le coefficient d'extinction du brouillard K_{ext} est calculé à partir de la concentration totale N (en m^{-3}), fournie par l'utilisateur et de la section efficace d'extinction moyenne C_{ext} , calculée dans NUEPHASE :

$$K_{ext} = NC_{ext} = N \sum_i C_{ext_i} = N\pi \sum_i Q_{ext_i} n_i r_i^2$$

n_i est la fréquence de la classe de rayon r_i , C_{ext} et Q_{ext_i} sont respectivement les sections efficaces et les facteurs d'efficacité d'extinction associés à la classe de rayon r_i . Ceci est à rapprocher de l'équation (1).

Un nombre de photons, proportionnel au flux élémentaire associé à chaque direction incidente de la source, est envoyé dans le milieu soit :

$$\frac{\text{Nombre de photons associé à une direction}}{\text{Nombre total de photons}} \times \text{flux élémentaire flux total}$$

Un vecteur de propagation est affecté à chacun de ces photons, dont la progression dans le milieu s'effectue en suivant les lois de probabilité décrites précédemment.

Avant sa rencontre avec une particule, le photon parcourt une distance décrite par l'équation (2). Durant ce trajet il peut, soit rencontrer la chaussée (et être absorbé, réfléchi ou diffusé selon le choix fait par l'utilisateur), soit sortir du milieu dans la direction des z positifs ou négatifs.

Dans les deux cas il peut avoir, auparavant, rencontré un détecteur et sera alors comptabilisé. Les photons reçus peuvent être classés selon l'angle sous lequel ils frappent le détecteur ou selon d'autres critères tels que :

- photons directs (c'est-à-dire n'ayant rencontré aucune gouttelette durant son trajet),
- photons diffusés une fois,
- photons diffusés n fois ($n \geq 2$).

Lors de la collision avec une gouttelette, le photon peut être absorbé (r_{al} supérieur à l'albedo) ou diffusé (r_{an} inférieur à l'albedo).

Dans ce dernier cas, la direction de diffusion est déterminée par les angles θ et Ψ [équations (3) et (4)]. Le photon poursuit sa route dans cette nouvelle direction et sur une distance toujours estimée par l'équation (2). Les opérations décrites avant sa rencontre avec une particule sont à nouveau effectuées jusqu'à ce que le photon sorte du milieu ou soit éventuellement absorbé par la chaussée. Un nouveau photon est alors extrait de la source.

Résultats rendus par le code

Lorsque tous les photons ont été lancés, les éclairages reçus par chaque détecteur sont calculés. Le flux élémentaire ϕ , en lumen, associé à un photon est donné par :

$$\phi = \frac{\Phi_T}{N_T}.$$

Φ_T étant le flux total émis par la source et N_T le nombre total de photons lancés.

Le nombre de photons N_D comptabilisés sur chaque détecteur est transformé en flux Φ_D :

$$\Phi_D = N_D \phi$$

Les éclairements E_D sont calculés par :

$$E_D = \frac{\Phi_D}{S_D} = \frac{N_D \varphi}{S_D} \quad (5)$$

S_D est l'aire du détecteur. L'éclairage total est décomposé en éclairements direct et diffusé, une ou n fois.

Dans le cas du « détecteur conducteur », les photons provenant de la diffusion de la lumière dans l'épaisseur de brouillard situé devant lui correspondent à la luminance de voile. Celle-ci représente un paramètre important car elle contribue à la fois à la luminance d'adaptation du conducteur et, dans les calculs de contraste, à la luminance de fond sur laquelle se détachent les objets.

Le flux Φ_C , reçu par le « détecteur conducteur » (de surface S_C), est lié à la luminance de voile L_V induite par le brouillard éclairé, dans l'angle solide $d\Omega_C$, dans la direction θ , par la relation :

$$d^2\Phi_C = L_V \cos\theta \, d\Omega_C \, dS_C$$

En remplaçant $d\Omega_C$ par sa valeur ($2\pi \sin\theta \, d\theta$) et après intégration sur l'angle de réception choisi, on aboutit à la relation :

$$L_V = \frac{\Phi_C}{\pi S_C \sin^2 \theta} = \frac{N_C \varphi}{\pi S_C \sin^2 \theta}$$

N_C est le nombre de photons collectés sur le détecteur conducteur sous l'angle θ de récep-

tion et φ le flux élémentaire associé à un photon.

Simulations réalisées

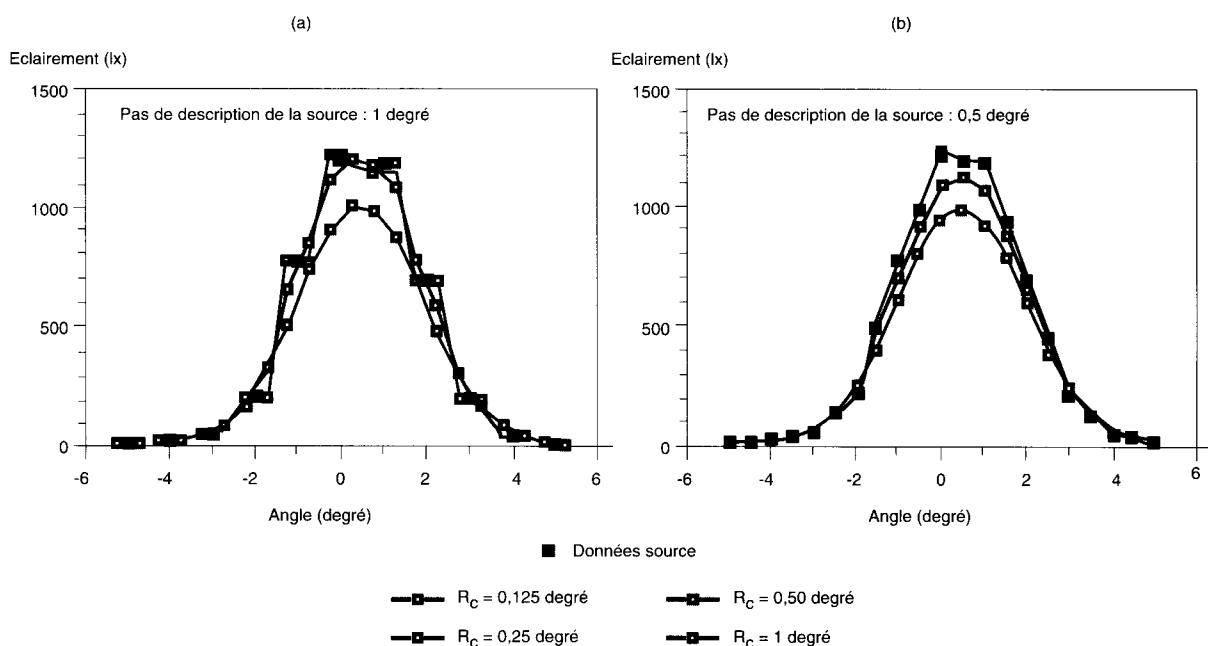
L'objectif de cette étude [2] est, d'une part, de mesurer l'impact sur les simulations réalisées d'un certain nombre de paramètres tels que la description d'une source, la taille et la position des détecteurs et, d'autre part, d'étudier l'influence de la distribution granulométrique des gouttelettes sur les éclairements et luminances calculés.

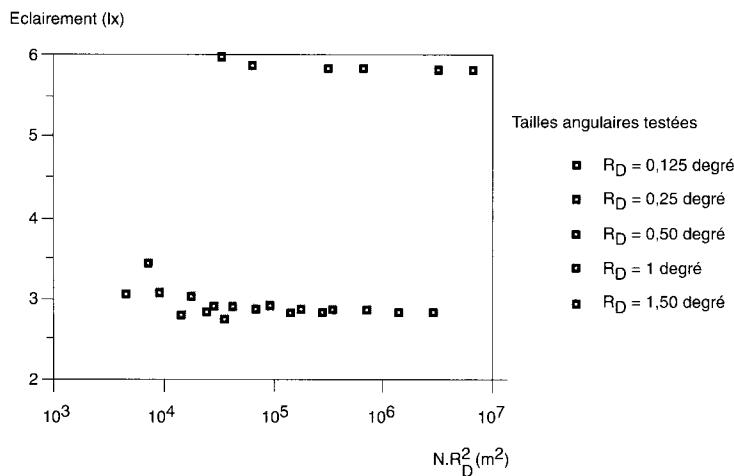
Définition des sources et des détecteurs en transmission parfaite

La répartition spatiale du flux émis par les sources utilisées en circulation routière est souvent complexe. On procède donc à la mesure des intensités émises dans toutes les directions. Le pas de mesure est approprié à d'éventuelles zones de forts gradients d'intensité.

La position et la taille des détecteurs doivent être adaptées au pas de mesure décrivant la source sous peine de faire apparaître des artefacts. La figure 3a, par exemple, présente des « marches d'escalier » pour des détecteurs de 0,125 et 0,25 degré de rayon angulaire alors que ce phénomène n'existe pas sur la figure 3b. L'augmentation de la taille du détecteur provoque un phénomène classique de lissage ($R_D = 1$ degré).

Fig. 3 - Défauts pouvant apparaître lorsque les dimensions et/ou la position des détecteurs ne sont pas adaptées





La répartition de l'éclairement dans la zone étudiée doit également être prise en compte. S'il est homogène, l'éclairement calculé doit être indépendant du nombre de photons lancés N ainsi que de l'aire du détecteur de rayon R_D . La figure 4 présente un exemple des éclairements obtenus, en fonction du produit $N R_D^2$. Ce type de représentation permet de mettre rapidement en évidence les fluctuations statistiques ou les tailles de détecteurs mal adaptés. Généralement plusieurs solutions répondent aux critères de convergence des valeurs d'éclairement calculés. Si le ou les choix définitifs doivent optimiser le temps de calcul, ils doivent également tenir compte du fait que le nombre de photons atteignant les détecteurs dans le brouillard peut être inférieur à celui obtenu en transmission parfaite.

Granulométries testées

La vocation de MUSCAT est de simuler le cheminement de la lumière dans des milieux multidifusifs. Or les phénomènes de diffusion sont sensibles à la granulométrie des particules. Une étude bibliographique [3] a mis en évidence une grande diversité dans la constitution des brouillards naturels. Ainsi, plusieurs auteurs citent des rayons moyens de quelques dixièmes à quelques dizaines de micromètres. À cette diversité s'ajoute la difficulté de mesurer des diamètres inférieurs à $0,5 \mu\text{m}$. Le choix des granulométries testées lors de cette première étape part de ces constats.

Description des distributions granulométriques étudiées

Les premières distributions granulométriques testées présentent l'évolution du spectre lors de

la dissipation du brouillard (fig. 5). Ces mesures ont été réalisées dans les salles de brouillard du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand [4], à l'aide d'un granulomètre POLYTECH HC15 mis à disposition par la Fédération universitaire Luxembourgeoise. L'ordonnée représente la concentration (cm^{-3}) par classe de diamètre, ces classes étant ramenées à une largeur unitaire (μm^{-1}). Dans ce cas la diminution du coefficient d'extinction K_{ext} est due à la fois à une baisse de la concentration N et à l'évolution granulométrique ; en effet la disparition progressive des gouttelettes de $1,5$ à $2,5 \mu\text{m}$ entraîne une diminution de la section efficace d'extinction moyenne C_{ext} (Tableau I) et donc de $K_{\text{ext}} = N C_{\text{ext}}$. Cet ensemble de spectres constitue la granulométrie nommée « brouillard n° 3 » dans la suite.

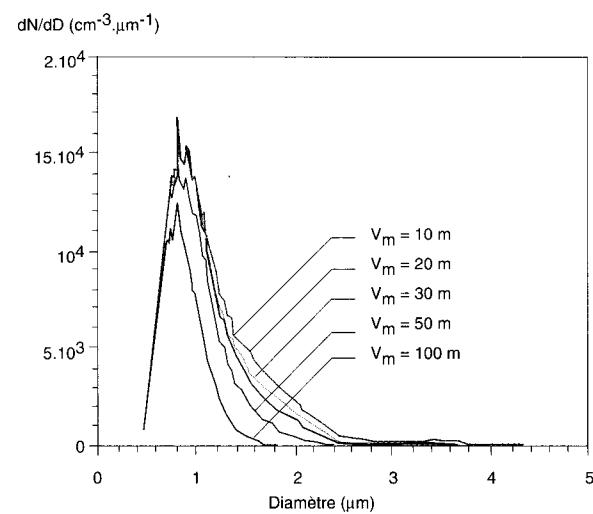


Fig. 5 - Évolution des distributions granulométriques pendant la dissipation du « brouillard n° 3 ». V_m est la visibilité météorologique correspondant aux différentes étapes de la dissipation.

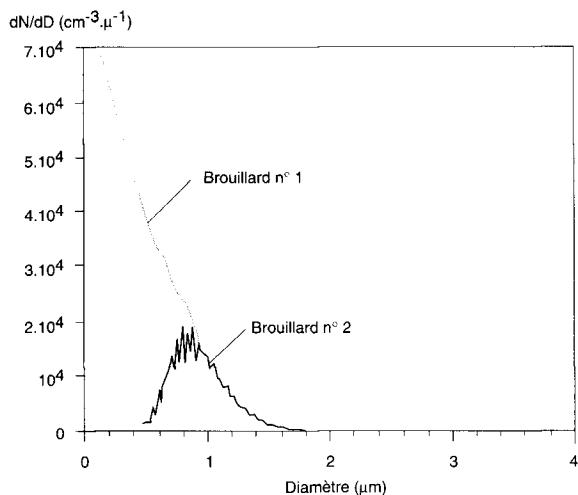


Fig. 6 - Distributions granulométriques du « brouillard n° 1 » (trait pointillé) et du « brouillard n° 2 » (trait continu).

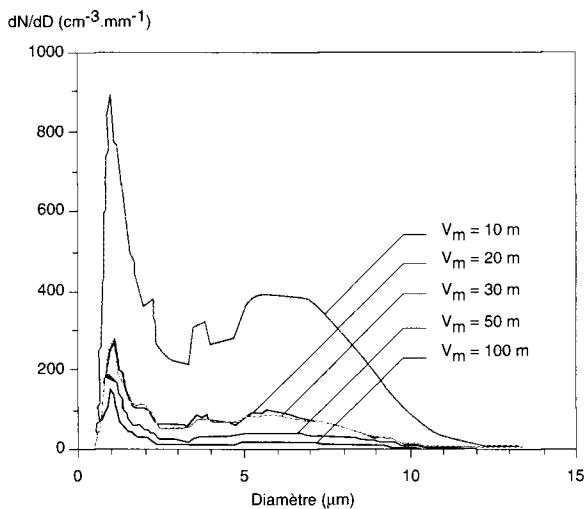


Fig. 7 - Évolution des distributions granulométriques pendant la dissipation du « brouillard n° 4 ». V_m est la visibilité météorologique correspondant aux différentes étapes de la dissipation.

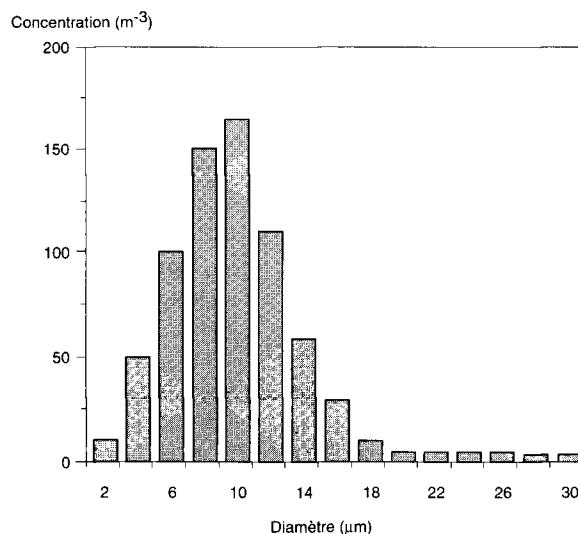


Fig. 8 - Distribution granulométrique du « brouillard n° 5 ».

La granulométrie de la distribution présentée en trait continu sur la figure 6 est similaire aux précédentes. Elle est appelée « brouillard n° 1 » et simule un brouillard dont la variation du coefficient d'extinction n'est due qu'à l'évolution de la concentration (C_{ext} constant).

Afin d'appréhender l'incidence d'un nombre important de gouttes de diamètre inférieur au micron une courbe granulométrique a été simulée par extrapolation, à partir de la courbe « brouillard n° 2 », jusqu'à un diamètre minimum de 0,1 µm. Elle est présentée en pointillé sur la figure 6 et repérée par la dénomination « brouillard n° 1 ».

Deux autres distributions granulométriques l'une, bimodale (1 et 6 µm) appelée « brouillard n° 4 » (fig. 7), et l'autre monomode, centrée sur 10 µm et nommée « brouillard n° 5 » (fig. 8), ont également été testées.

Les sections efficaces d'extinction moyennes calculées par NUEPHASE pour l'ensemble des distributions testées sont rassemblées dans le tableau I. Quelques-unes des fonctions de phase associées sont présentées sur la figure 9 en coordonnées polaires logarithmiques.

TABLEAU I
Sections efficaces d'extinction associées aux granulométries testées, calculées par le module NUEPHASE

Dénomination de la granulométrie	Coefficient d'extinction (m^{-1})	Section efficace d'extinction (μm^2)
brouillard n° 1	Tous	0,81
brouillard n° 2	Tous	2,51
brouillard n° 3	0,03	2,36
	0,06	2,96
	0,10	3,39
	0,15	3,67
	0,30	4,12
brouillard n° 4	0,03	42,85
	0,06	48,83
	0,10	47,27
	0,15	49,69
	0,30	57,49
brouillard n° 5	Tous	197,84

Conditions fixées pour les comparaisons

Le flux lumineux diffusé par une particule dépend de la section efficace de diffusion C_{sca} qui, dans un brouillard d'eau, est égal à la section efficace d'extinction C_{ext} . Le flux total diffusé par un ensemble de particules dépend de leur concentration N par unité de volume. C'est donc le produit $N C_{sca} = N C_{ext} = K_{ext}$, c'est-à-dire le coefficient d'extinction, qui caractérise le flux total diffusé par unité de volume.

C'est donc à coefficient d'extinction constant que les différentes situations simulées seront comparées entre elles.

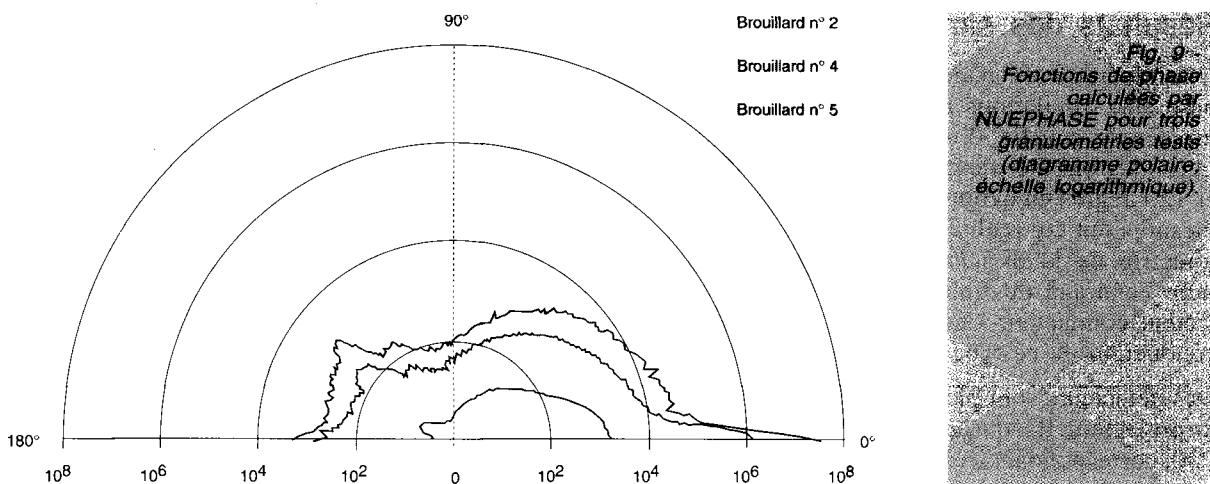
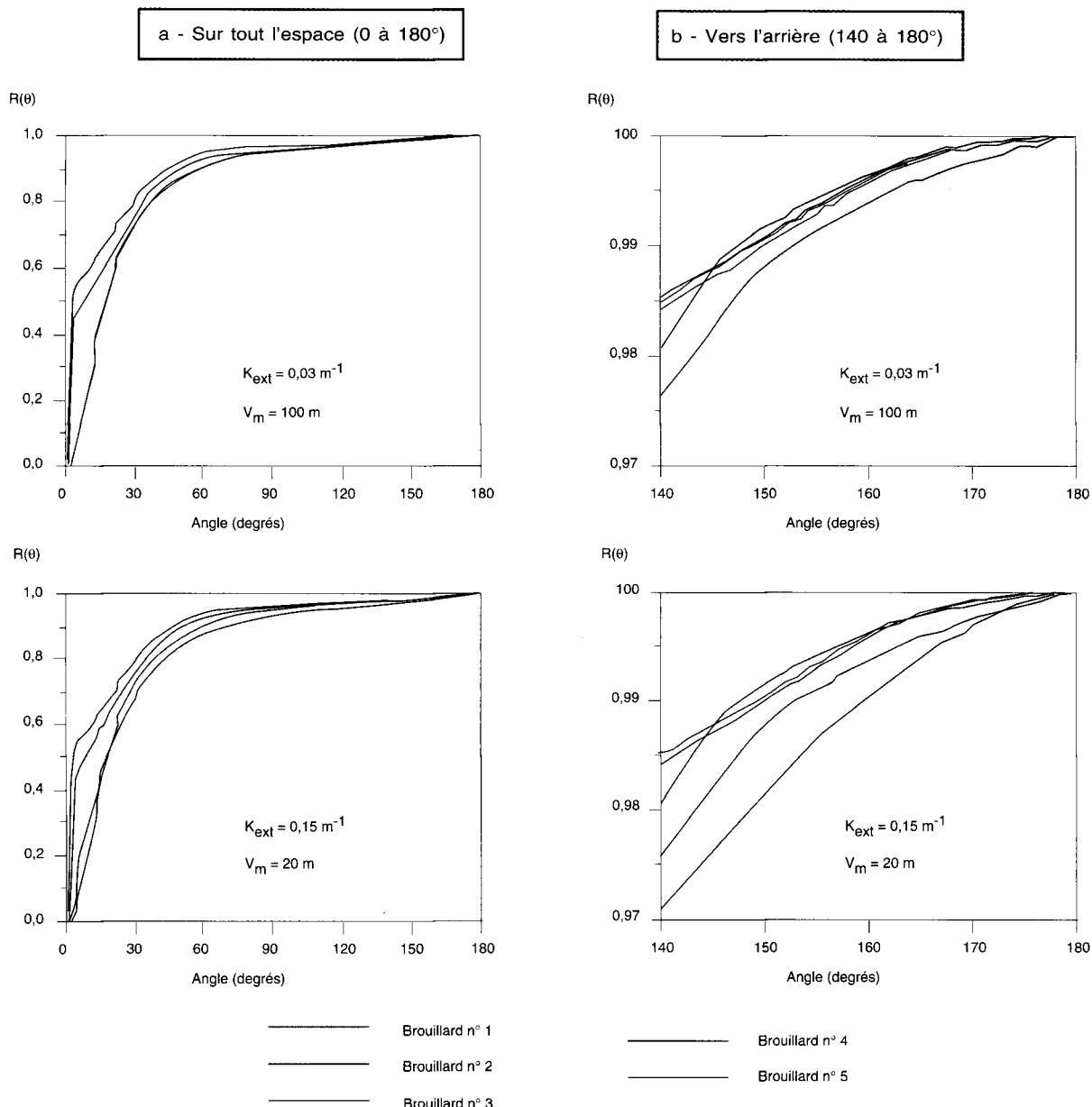


Fig. 10 - Fonctions de répartition correspondant aux granulométries testées, pour deux densités de brouillard



Résultats des simulations réalisées

Une situation de conduite schématisée sert de base aux simulations réalisées. La source est le projecteur gauche d'une Peugeot 205 dont les intensités ont été mesurées sur 60 degrés en site et 120 degrés en azimut, par pas d'un degré. Ces mesures ont été réalisées au Laboratoire de photométrie de la division Exploitation, signalisation, éclairage du Laboratoire central. Le « détecteur conducteur » est centré sur la position du conducteur de ce type de véhicule.

Des détecteurs sont placés à différentes distances du projecteur. Ils sont centrés sur les directions tests P30, correspondant à un panneau de rive à 30 mètres du conducteur, et 30R, direction d'un marquage à droite de la chaussée à la même distance.

La longueur totale du brouillard est fixée à 30 mètres. Pour chaque simulation le brouillard est caractérisé par :

- le coefficient d'extinction. Les simulations ont été réalisées pour cinq valeurs du coefficient d'extinction soit 0,03 ; 0,06 ; 0,10 ; 0,15 et $0,30 \text{ m}^{-1}$, ce qui correspond à des visibilités météorologiques de 100, 50, 30, 20 et 10 mètres ;
- la fonction de répartition, déduite de la fonction de phase, et régissant les changements de direction des photons lors de chaque diffusion. La figure 10 illustre les fonctions de répartition des différents types de brouillards testés, pour deux valeurs particulières de densité.

Luminance de voile

La diffusion de la lumière sur les gouttelettes de brouillard produit un voile lumineux. La luminance de voile est calculée sous des angles d'ouverture du « détecteur conducteur » de 2, 10, 20 et 40 degrés, et pour différents rayons : 20, 30, 40 et 50 cm. Les luminances obtenues dans un brouillard de type « brouillard n° 5 » sont illustrées, en fonction de la taille du détecteur, sur les figures 11a, pour $K_{\text{ext}} = 0,10 \text{ m}^{-1}$, et 11b, pour $K_{\text{ext}} = 0,30 \text{ m}^{-1}$. Ces figures mettent en évidence l'hétérogénéité de la luminance du brouillard dans de telles conditions. En effet, celle-ci augmente avec la taille du récepteur mais également avec son ouverture angulaire. Seule l'ouverture de 40 degrés, intégrant un volume important, moyenne les écarts. L'hétérogénéité constatée entraîne une dépendance de la luminance de voile avec la position exacte attribuée au conducteur et de la direction dans laquelle il regarde. L'absence de courbes correspondant à l'ouverture de deux degrés s'explique par le nombre trop faible de photons collectés.

Le choix de l'angle sous lequel la luminance est calculée dépend de l'effet physique à simuler (luminance d'adaptation, luminance de fond

pour un objet spécifique, etc.). Quant aux dimensions du « détecteur conducteur » elles doivent être suffisantes pour assurer l'indépendance de la luminance calculée (fig. 11). Cette taille minimum peut s'avérer irréaliste et supprimer toute précision de position du conducteur. Dans ce cas, le choix se portera sur un détecteur de dimensions inférieures ne permettant de simuler que des niveaux de luminance relatifs (et non absolu) ; seules des comparaisons de situations seront alors possibles.

L'influence de la granulométrie des brouillards sur les luminances de voile peut ainsi être étudiée. Les résultats sont présentés sur la figure 12, pour un détecteur de 40 cm de rayon et des ouvertures de 10 et 40 degrés. Cette figure montre que le coefficient d'extinction ne suffit pas à caractériser un brouillard puisque, pour une même valeur de K_{ext} , la luminance de voile peut doubler en fonction de la granulométrie considérée. Ces écarts sont liés aux disparités des fonctions de répartitions entre 140 et 180 degrés (fig. 10b). Il faut toutefois noter que les niveaux de luminance ne dépassent pas $1,5 \text{ cd/m}^2$ pour un projecteur de ce type.

Directions tests

Les détecteurs, centrés sur les directions P30 et 30R définies précédemment, sont placés dans des plans situés à 5, 10, 20, et 30 mètres du projecteur de véhicule. Leur rayon R_D et le nombre de photons lancés N_{ph} ont été choisis selon les critères de convergence des valeurs d'éclairements calculés sans brouillard soit :

- dans la direction P30 : $R_D = 0,5 \text{ deg}$, $N_{\text{ph}} = 10^8$,
- dans la direction 30R : $R_D = 0,25 \text{ deg}$, $N_{\text{ph}} = 5,10^7$.

Les éclairements (total, direct et diffusé) sont calculés pour chaque détecteur. L'éclairement direct, calculé à partir des photons n'ayant subit aucune collision sur la distance d , correspond à la loi de Beer-Lambert :

$$E = E_0 e^{-K_{\text{ext}}d} = E_0 T$$

L'influence des différents types de brouillards sur les éclairements simulés dans les directions P30 et 30R peut être analysée, d'une part, en comparant les deux directions entre elles et, d'autre part, en étudiant les écarts à la loi de Beer-Lambert.

La comparaison des directions P30 et 30R fait apparaître deux situations nettement différentes. La direction P30, située au-dessus de la coupure, est fortement éclairée par la lumière diffusée à partir de la zone située sous la coupure. Dans cette direction l'influence de la diffusion reste supérieure à l'extinction jusqu'à des épaisseurs optiques dépendant du type de brouillard, ce qui entraîne tout d'abord une augmentation de

Fig. 11 - Variation des luminances de voile produites par un projecteur de véhicule, en fonction de la taille et de l'ouverture angulaire du « détecteur conducteur », pour deux densités du « brouillard n° 5 »

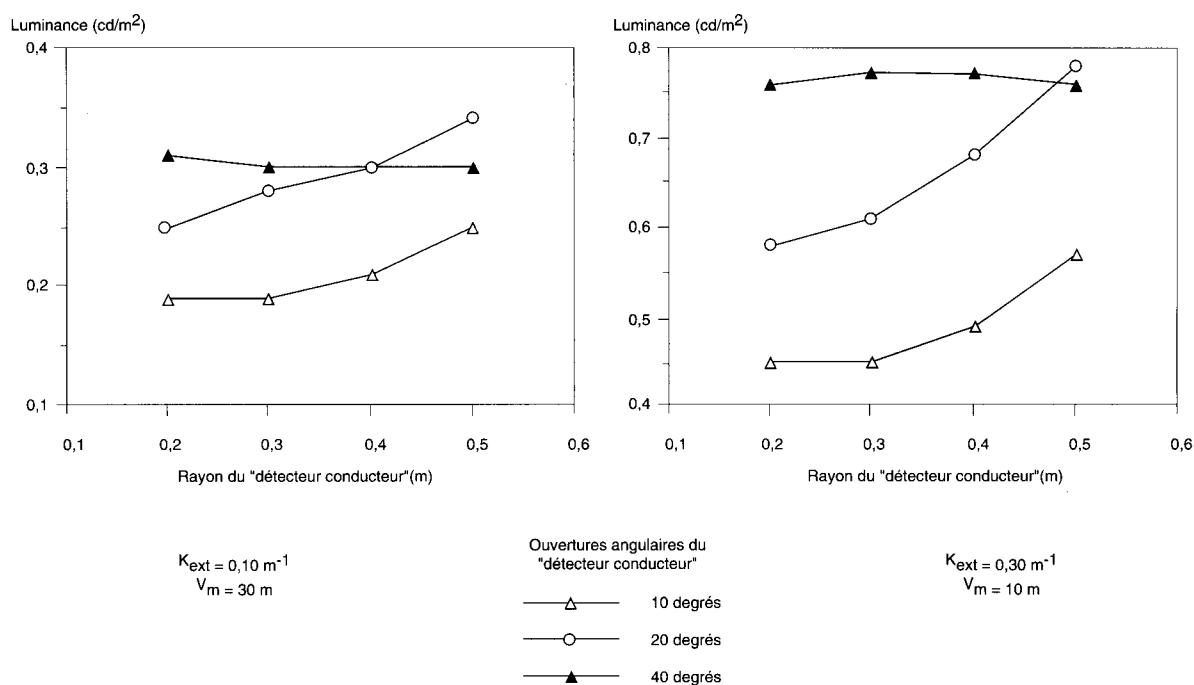
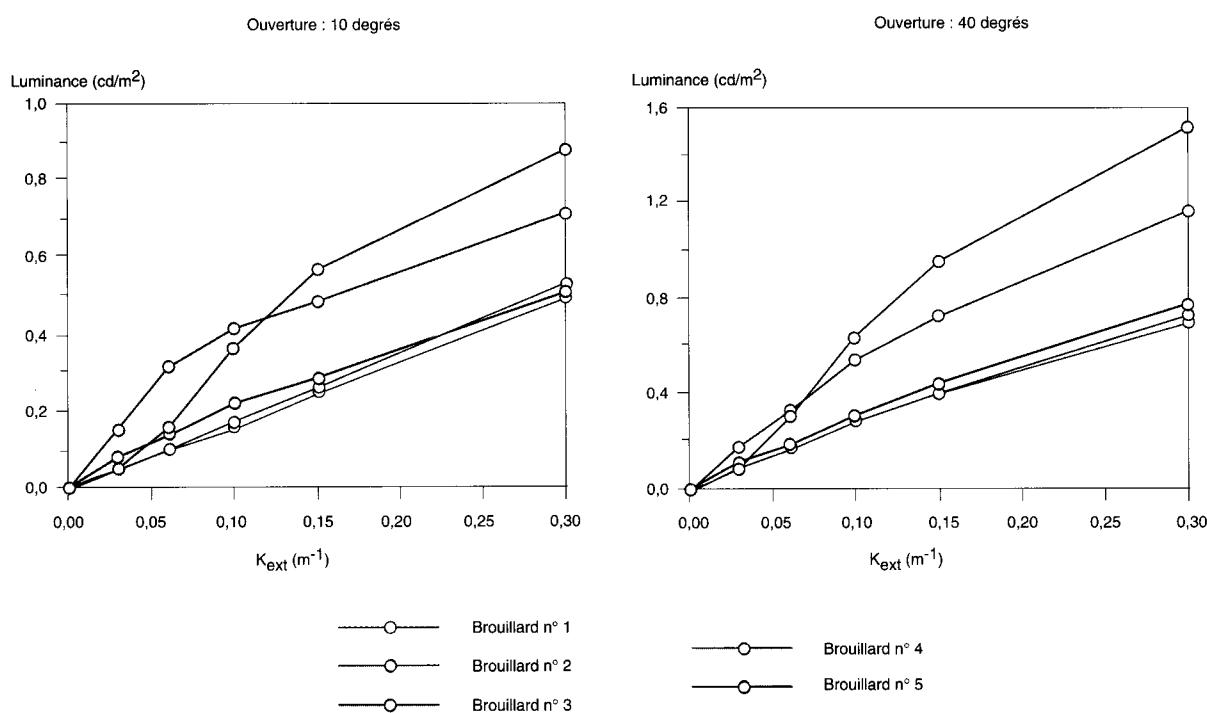


Fig. 12 - Influence de la granulométrie des brouillards sur les luminances de voile produites par un projecteur de véhicule



l'éclairement total (fig. 13) ; puis le phénomène s'inverse, l'extinction prédomine et les éclairages diminuent. Pour les détecteurs centrés sur la direction 30R (fig. 14) l'extinction prévaut sur la diffusion quelle que soit l'épaisseur optique, l'éclairement décroît de façon monotone.

L'influence de la granulométrie sur les éclairages simulés coïncide avec cet antagonisme diffusion-extinction (fig. 13 et 14). Tout se passe comme si ces deux phénomènes étaient plus efficaces sur les brouillards de faible granulométrie.

En effet, lorsque la diffusion est prépondérante, les éclairages obtenus à travers les petites gouttelettes sont maximum. Puis, lorsque l'extinction prévaut, ces mêmes gouttelettes atténuent plus fortement la lumière ; les éclairages transmis par les brouillards à forte granulométrie sont alors plus importants. Dans ce cas le flux transporté par le faisceau est suffisant pour maintenir l'effet de la diffusion simple c'est à dire une forte diffusion des grosses gouttes vers l'avant (fig. 10). L'interprétation dans la direction P30 est plus complexe.

Fig. 13 - Éclairage total calculé dans la direction d'un panneau de rive à 30 m d'un automobiliste (P30), pour trois granulométries de brouillard

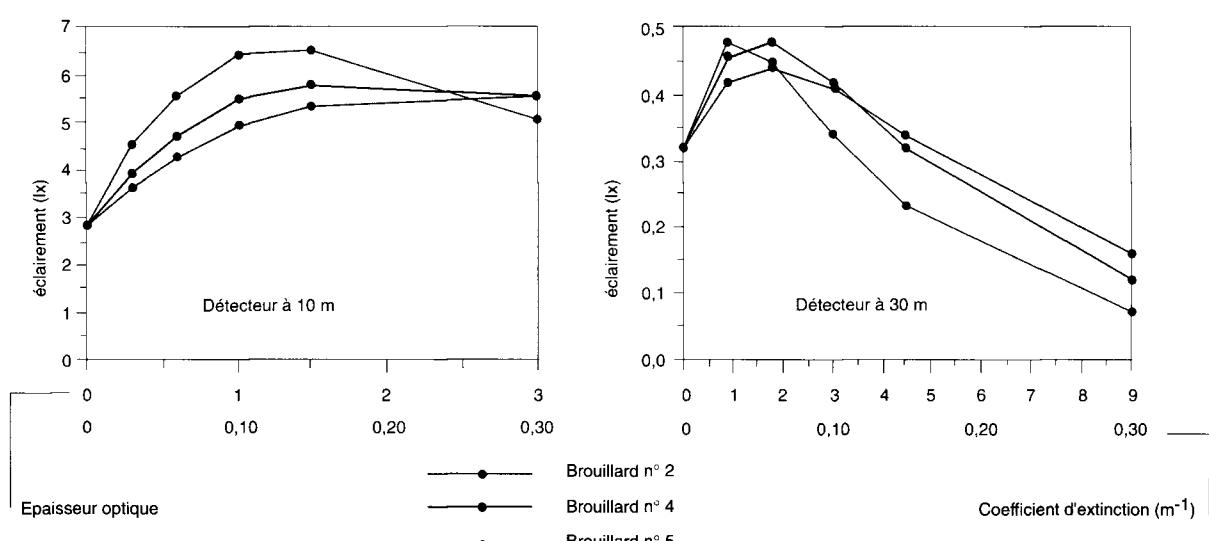


Fig. 14 - Éclairage total calculé dans la direction d'un panneau de rive à 30 m d'un automobiliste (30R), pour deux granulométries de brouillard

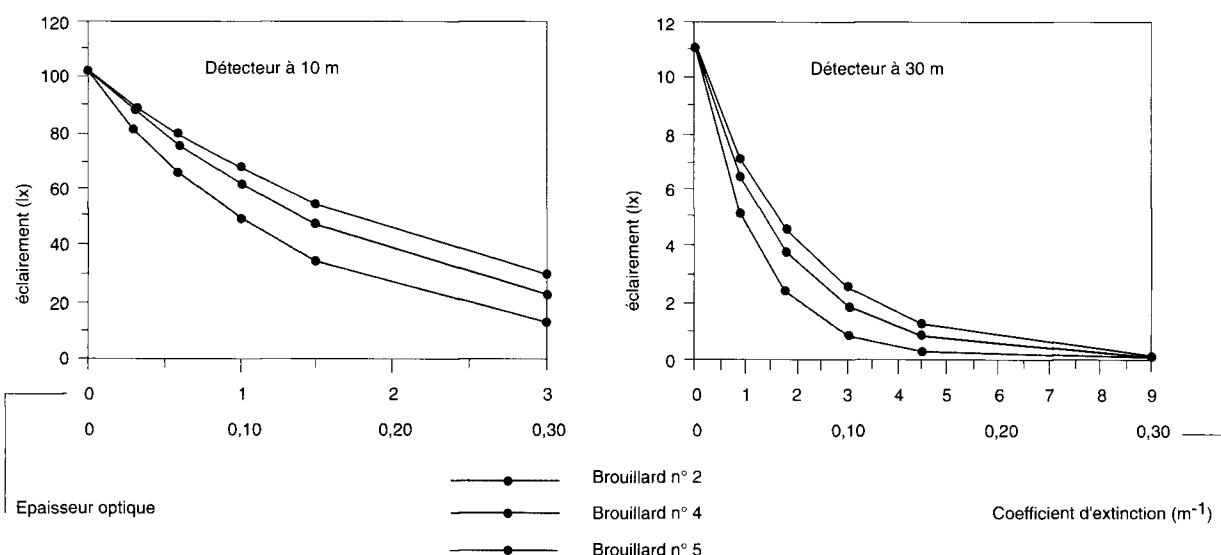
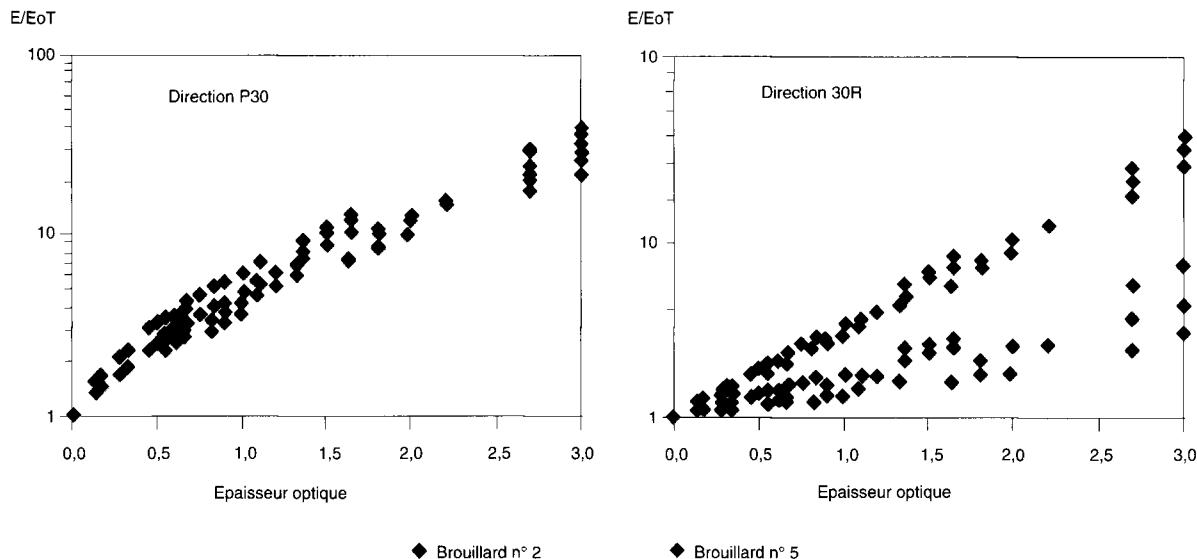


Fig. 15 - Écarts à la loi de Beer-Lambert des éclairements calculés dans les directions P30 et 30R



Dans la seconde analyse les comparaisons entre les éclairements simulés et ceux obtenus par la loi de Beer-Lambert se déduisent des observations précédentes. Globalement les écarts à cette loi augmentent avec l'épaisseur optique et sont moins importants dans la direction 30R que dans la direction P30 (fig. 15). L'influence de la granulométrie dans la direction P30 n'est pas significative alors que la forte diffusion vers l'avant des grosses gouttes amplifie les écarts dans la direction 30R.

Conclusions

Les études expérimentales de visibilité en atmosphère perturbée sont difficiles à mettre en œuvre de par le nombre de paramètres influents à maîtriser (granulométrie et densité du brouillard, type d'éclairage, géométrie du site étudié, caractéristiques photométriques des objets, etc.). La simulation s'avère donc incontournable. Le logiciel MUSCAT est un outil qui permet de simuler n'importe quelle géométrie 3D sans conditions particulières, ce qui ne veut pas dire sans les précautions attachées à cet outil et à son mode de fonctionnement.

Les tests présentés ici soulèvent, de manière non exhaustive, quelques problèmes rencontrés notamment dans les relations entre définition de source, position et taille de détecteurs. Les résultats indiquent comment choisir les paramètres décrivant les détecteurs, notamment en présence de forts gradients lumineux ou dans le cas de luminances de voile hétérogènes.

Un autre point traite de l'influence de la distribution granulométrique du brouillard. Ce paramè-

tre, dont la connaissance est souvent partielle, a-t-il des conséquences importantes sur les grandeurs photométriques servant de base à la visibilité ? Sur l'ensemble des brouillards testés, un rapport deux a été trouvé pour les luminances de voile produites par un feu de véhicule, celles-ci ne dépassant pas $1,6 \text{ cd/m}^2$ pour le type de projecteur utilisé. Concernant les éclairements, les résultats font apparaître des situations très différentes selon la présence ou l'absence de forts gradients lumineux à proximité de la zone étudiée. Si dans tous les cas la loi de Beer-Lambert sous-estime les éclairements, les écarts augmentent avec l'épaisseur optique et en présence de gradients lumineux ; dans ces cas complexes, MUSCAT conduit à des résultats pertinents. L'incidence du type de brouillard sur ces écarts est surtout sensible dans les zones fortement éclairées.

Cette première étude a mis en évidence la complexité des relations entre granulométrie du brouillard et grandeurs photométriques servant de base aux études de visibilité. La sélection de brouillards types pour les simulations futures nécessite donc quelques tests complémentaires avec un échantillon plus diversifié de brouillard.

Pour atteindre l'objectif d'étudier « la visibilité des routes en atmosphère perturbée », d'autres étapes sont nécessaires car la visibilité ne dépend évidemment pas que de l'éclairement. Les caractéristiques photométriques des objets, par exemple, doivent être prises en compte, ce qui est réalisable avec MUSCAT [4]. Une nouvelle approche de la visibilité par temps de brouillard utilisant cet outil de simulation est d'ores et déjà engagée [5].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BRITON J.-P. (1989), *Simulations numériques de la diffusion de la lumière par une méthode de Monte-Carlo et applications*. Thèse de doctorat, université de Rouen.
- [2] PAULMIER G. (1993), *Formation et caractéristiques microphysiques des brouillards naturels*. Compte-rendu de la Division Exploitation, signalisation, éclairage du LCPC, 68 pages.
- [3] SÉRÉZAT L., COLOMB M., BOREUX J.-J. (1995), *Étude préliminaire de la granulométrie du brouillard artificiel produit dans les chambres à brouillard du LRPC de Clermont-Ferrand*, Compte-rendu du LRPC de Clermont-Ferrand, 45 pages.
- [4] ROZÉ C., MAHEU B., GRÉHAN G., MÉNARD J. (1994), *Evaluations of the sighting distance in a foggy atmosphere by Monte-Carlo simulation*, Atmospheric environment, Vol. 28, 5, pp. 769-775.
- [5] DUMONT E., ZOUBOFF V. (1996), *Approche de la vision dans le brouillard par la fonction de transfert de contraste*, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, 203, mai-juin, pp. 13-22.

