

Étude théorique de l'influence de l'éclairage sur la visibilité dans le brouillard*

RÉSUMÉ

La conduite par temps de brouillard est très dépendante de la visibilité des indices qui servent habituellement de repères. De nuit, on a constaté que les conducteurs prennent souvent pour repère le véhicule qui le précède, on a donc examiné, à titre d'exemple, en l'absence et en présence de deux types d'éclairage, les distances de visibilité d'un feu arrière de véhicule.

Dans une première partie, l'article présente les bases sur lesquelles s'appuie la démarche théorique. On expose en premier lieu un résumé des connaissances en matière de visibilité nocturne. Le modèle utilisé est le modèle d'Adrian, dont les données sont fournies par une méthode de simulation utilisant le code dit de « Monte Carlo ». Il s'agit d'un code qui calcule le parcours de la lumière en tenant compte de la diffusion de la lumière par des gouttelettes de brouillard.

Dans une deuxième partie, on décrit les différents types d'éclairage pris en considération dans cette étude, et on compare les distances de visibilité calculées pour chacune des conditions.

MOTS CLÉS : 85-82-73 - Éclairage public - Visibilité - Brouillard - Conduite (véh.) - Distance de visibilité - Feu arrière - Nuit - Modèle numérique - Simulation - Diffusion - Lumière - Méthode de Monte-Carlo.

Bruno MAHEU
Professeur des universités

Claude ROZÉ
Maître de conférences

Thierry GIRASOLE
Ingénieur de recherche

URA CNRS 230
Institut national des Sciences appliquées de Rouen

Jean MÉNARD
Chef de la Section physique des rayonnements
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Rouen

Introduction

La sécurité et la gestion de la conduite automobile sont très dépendantes des conditions de visibilité. Aussi, on s'interroge toujours sur les améliorations que pourrait apporter, de nuit et par temps de brouillard, l'éclairage public ou sur l'optimisation des installations d'éclairage à cette fin. Toute expérimentation en site réel dans ce domaine est très difficile. Elle peut présenter des dangers, ce qui justifie que l'on ait préféré une approche théorique des problèmes.

Cet article présente donc les résultats d'une démarche théorique concernant la visibilité de nuit dans le brouillard. Cette démarche fait la jonction entre les connaissances acquises en matière de visibilité nocturne et un modèle permettant de calculer la diffusion de la lumière par les particules du brouillard. La diffusion de la lumière fait appel à un modèle de « Monte Carlo ». Le code de calcul considère la lumière comme un ensemble de photons et construit leur parcours dans le brouillard. On détermine ainsi les paramètres essentiels tels que la luminance de l'environnement et la luminance des objets qui servent de base au calcul des distances de visibilité. Différents types d'installations d'éclairage sont examinés.

* Cette étude est le résultat d'une collaboration entre le CETE Normandie-Centre et l'Université de Rouen, avec la participation de Mme Corfdir (SÉTRA).

Visibilité nocturne en atmosphère claire

Le milieu est parfaitement transparent en atmosphère claire. La lumière se propage en ligne droite de la source vers le récepteur, sans perte. La visibilité d'un objet se calcule aisément à partir des paramètres suivants :

- les caractéristiques géométriques et photométriques de l'objet et de son environnement,
- les performances de l'œil de l'observateur,
- la complexité de la tâche à laquelle est soumis l'observateur.

Les caractéristiques de l'objet

Un objet est d'autant plus perceptible que sa surface apparente est importante et qu'il se détache sur son fond proche. Ces deux caractéristiques sont prises en compte par :

- son diamètre apparent (θ) exprimé en minutes d'angle,
- son contraste.

Soit L_O la luminance de l'objet et L_F la luminance du fond proche. Le contraste est lié à la différence de luminance, ΔL , entre l'objet et son fond proche.

$$\Delta L = L_O - L_F$$

Les caractéristiques de l'environnement

Pour s'adapter à la luminosité ambiante, la pupille de l'œil s'ouvre ou se ferme. Il s'agit de contrôler ainsi l'énergie lumineuse recueillie par la rétine. Ce mécanisme dépend de la luminance pondérée du panorama prise en compte par la luminance d'adaptation. La pondération consiste à accorder beaucoup d'importance aux luminances des éléments proches de la direction d'observation et moins d'importance aux luminances de ceux qui sont éloignés de cette direction.

Seuil différentiel de luminance

La luminance d'adaptation et le diamètre apparent de l'objet déterminent les conditions d'observations, et donc les performances visuelles de l'observateur. Le niveau de performance est exprimé par le « seuil différentiel de luminance », c'est-à-dire la différence minimale de luminance perceptible dans ces conditions.

$$\Delta L_{\text{seuil}} = f(L_a, \theta)$$

Modèle d'Adrian

Après regroupement de nombreuses données expérimentales, Adrian [1] a proposé un modèle permettant de relier ce seuil différentiel de luminance ΔL_s à différents paramètres d'influence.

Ces relations ont été établies à partir des observations réalisées par 234 personnes. La relation globale est de la forme :

$$\Delta L_s = 2,6 \left(\frac{\Phi^{1/2}}{\theta} + \xi^{1/2} \right)^2 \text{ cd/m}^2$$

Dans cette expression :

- θ est le diamètre apparent de la cible, en mètre,
- ξ et Φ sont des fonctions de la luminance d'adaptation (L_a), en candelas.

Les seuils différentiels donnés par cette relation s'appliquent à des observateurs âgés de 23 ans.

Il est nécessaire de compléter cette relation par des corrections supplémentaires concernant :

- l'âge de l'observateur,
- le temps d'observation,
- la polarité du contraste (objet clair sur fond sombre, ou objet sombre sur fond clair).

Le facteur d'âge (F_A) permet de corriger ΔL_s en fonction de l'âge des observateurs.

La formulation de base concerne des temps d'observation de 2 secondes (un temps considéré comme illimité). Si le temps d'observation est plus faible, le contraste nécessaire pour percevoir la cible doit être plus élevé. Le seuil de luminance différentiel ΔL_s est plus grand.

À titre d'exemple, le facteur de correction R par lequel il faut multiplier ΔL_s serait pour :

- | | |
|----------------------|-------------|
| – $t = 2$ secondes | $R = 1$ |
| – $t = 0,1$ seconde | $R = 2,11$ |
| – $t = 0,01$ seconde | $R = 12,66$ |

(valeurs établies pour $\theta = 10'$ et $L_a = 1 \text{ cd/m}^2$).

La dernière correction concerne la polarité du contraste. D'après Aulhorn, une cible en contraste négatif (objet sombre sur fond clair) est plus visible qu'une cible en contraste positif (objet clair sur fond sombre). Le facteur de polarité de contraste (F_{CP}), déduit des expérimentations, permet de déterminer le contraste équivalent d'une polarité à une autre. F_{CP} est également une fonction de θ et de L_a .

Le niveau de visibilité

Le « niveau de visibilité VL » d'un objet est défini par le rapport entre le contraste réel et le contraste seuil. Plus le rapport est important, plus l'objet est visible.

Soit un objet dont la luminance est L_O et le diamètre apparent θ .

Le fond proche de l'objet a une luminance L_F .

La luminance d'adaptation est L_a .

L'écart de luminance réel est :

$$\Delta L_{\text{réel}} = |L_O - L_F|$$

Le niveau de visibilité VL est donc :

$$VL = \frac{\Delta L_{\text{réel}}}{\Delta L_{\text{seuil}}} = \frac{|L_O - L_F|}{\Delta L_{\text{seuil}}}$$

Le niveau de visibilité VL est une grandeur qui exprime parfaitement la qualité de la visibilité. Les résultats de différentes études ont permis de définir les niveaux de visibilité souhaitables d'un élément du panorama pour qu'il soit vu par un observateur.

Le niveau de visibilité nécessaire pour percevoir un objet dépend des caractéristiques du site et de l'objet, mais aussi de la tâche accomplie par l'observateur, la conduite automobile par exemple.

La littérature indique que la valeur minimale du niveau de visibilité VL est de 7 pour percevoir un objet en un temps de l'ordre de 350 ms [2]. La conduite automobile demande un niveau de visibilité de 15 à 20 [6] mais, pour détecter un piéton dans un site bruité (présence de sources de lumières parasites), il faut que le niveau de visibilité VL soit de l'ordre de 45 à 50 [5].

Influence du brouillard sur la visibilité nocturne

Dans le cas du brouillard, il faut prendre en compte les caractéristiques du milieu, qui devient diffusant. La diffusion de la lumière a deux conséquences. D'une part, elle fait varier la luminance apparente de l'objet et du fond, d'autre part, elle interpose entre l'observateur et l'objet un voile lumineux (voile atmosphérique).

Propagation de la lumière dans le brouillard

L'interaction entre la lumière et les gouttes d'eau constituant le brouillard se traduit par un changement de direction de propagation. À chaque interaction, un photon est dévié de sa trajectoire avec une certaine probabilité. Si le nombre de photons émis est I_0 , le nombre de photons, n'ayant pas interagi, reçus par l'œil de l'observateur placé à une distance x de la source, est égal à I .

$$I = I_0 \cdot e^{-kx} \quad \text{loi de Beer-Lambert}$$

- k étant le coefficient d'extinction,
- x la distance entre la source et l'observateur.

k étant le coefficient d'extinction,
 x la distance entre la source et l'observateur.

Cette loi n'est qu'une approximation puisqu'elle considère que tout photon ayant interagi avec le brouillard n'atteint pas l'œil de l'observateur. En fait, la probabilité qu'un photon diffusé plusieurs

fois atteignant l'œil de l'observateur n'est pas nulle.

Modification du contraste

Dans le cas simple d'un objet et de son fond situés dans le même plan à une distance x de l'observateur, les diffusions ont pour effet d'atténuer les luminances apparentes.

Soit :

- L'_O et L_O les luminances apparente et intrinsèque de l'objet,
- L'_F et L_F les luminances apparente et intrinsèque du fond.

En se limitant aux relations simples de Beer-Lambert, on a :

$$L'_O = L_O \cdot e^{-kx} \quad \text{et} \quad L'_F = L_F \cdot e^{-kx}$$

Il y a donc diminution de l'écart de luminance puisque :

$$L'_O - L'_F = (L_O - L_F) \cdot e^{-kx}$$

Modification de la luminance d'adaptation

Si l'objet observé et son fond sont les seules sources de lumière, la luminance d'adaptation est également diminuée par le brouillard, puisque la quantité de lumière atteignant l'œil est réduite par la perte des photons diffusés dans des directions ne convergeant pas vers l'œil de l'observateur. En conséquence, le seuil différentiel de luminance est plus faible. Par contre, si le panorama nocturne contient des sources lumineuses, la lumière est diffusée et une partie atteint l'œil de l'observateur après diffusion créant une luminance de voile atmosphérique. Cette luminance a trois effets :

- elle augmente la luminance d'adaptation induisant ainsi une augmentation du seuil différentiel de luminance,
- elle se superpose à la luminance apparente des éléments du panorama,
- de plus, la diffusion entraîne une réduction de la quantité de lumière dirigée vers les objets du panorama ce qui, évidemment, réduit leurs luminances intrinsèques.

Modification du niveau de visibilité

Dans le cas où l'objet et son fond sont les seules sources de lumière, le brouillard entraîne comme dit précédemment, une diminution de la différence réelle de luminance entre l'objet observé et son fond proche et une diminution du seuil différentiel de luminance en raison de la baisse de la luminance d'adaptation. Mais, la différence de luminance réelle diminue plus rapidement que le

seuil différentiel, il en résulte une baisse du niveau de visibilité.

Dans la situation la plus générale où le panorama contient différentes sources de lumière telles que des luminaires d'éclairage public, des phares de véhicules, des enseignes etc., la lumière émise par ces sources est diffusée par le brouillard. Il y a augmentation du seuil différentiel de luminance et diminution de la différence réelle de luminance entre l'objet et le fond.

On observe donc une diminution notable du niveau de visibilité, beaucoup plus importante que dans le cas où il n'y a pas de sources autres que l'objet observé dans le panorama. D'une façon générale, la présence de sources lumineuses d'éclairage classique a donc une influence néfaste sur la visibilité en cas de brouillard nocturne.

Modélisation de la diffusion de la lumière

Pour prendre en compte la diffusion de la lumière, on fait appel à un modèle de calcul utilisant la méthode de « Monte Carlo » [4] permettant de simuler la diffusion multiple au moyen d'un code de calcul. Ce code considère la lumière comme un ensemble de photons et il suit leur progression dans le milieu diffusant située entre la source et l'œil de l'observateur.

Prise en compte des sources lumineuses

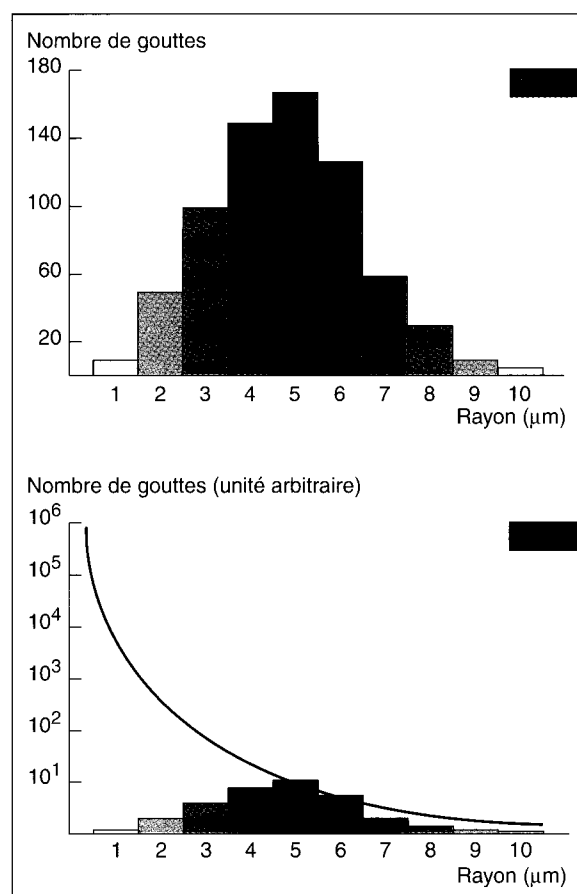
Les sources lumineuses introduites dans le modèle sont les luminaires et les phares de véhicule. Le modèle prend en compte la répartition spatiale des intensités lumineuses émises. Des études préliminaires ont montré que, dans la gamme du spectre visible et dans les conditions de nos études où l'épaisseur de brouillard traversée n'excède pas 150 m, on pouvait considérer la lumière comme monochromatique avec une longueur d'onde de 600 nm.

Le brouillard

Tous les brouillards considérés sont supposés homogènes, isotropes et non absorbants. Dans les situations étudiées, nous avons utilisé deux brouillards de granulométries différentes dont les distributions sont présentées sur la figure 1.

Le calcul de la propagation de la lumière nécessite de déterminer deux caractéristiques du brouillard : le « coefficient d'extinction » et la « fonction de phase ». La théorie de Lorenz-Mie permet de calculer ces deux paramètres essentiels.

Fig. 1 - Distribution des diamètres des gouttes de brouillard



a - Distribution mesurée en 1986 avec un appareil POLYTEC dans les salles de brouillard du Laboratoire Régional de Clermont-Ferrand.

b - Distribution continue proposée par Serpolay. La population précédente (a) mesurée en 1986, correspond à celle des grosses gouttes plus aisément prises en compte par les granulomètres.

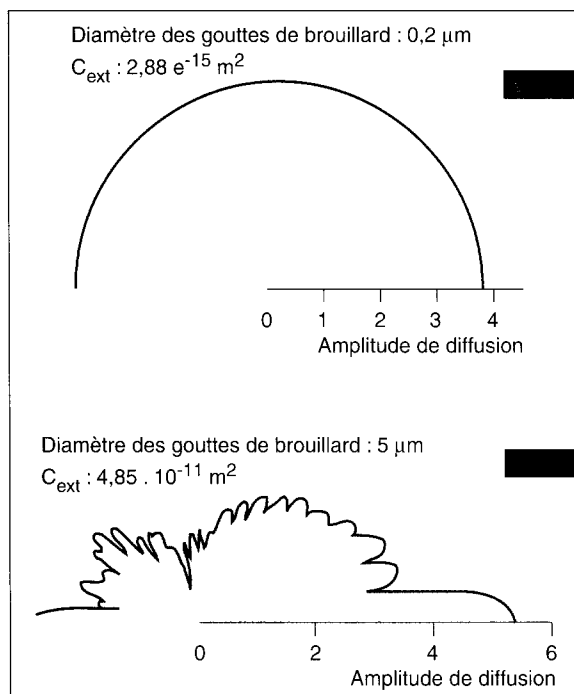
Le coefficient d'extinction K_{ext} est directement lié à la probabilité d'interaction dans le brouillard. Il est égal à :

$$K_{ext} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot C_{i\ ext}$$

- N_i étant l'effectif par unité de volume de la classe granulométrique i ,
- $C_{i\ ext}$ la section efficace d'extinction d'une goutelette de cette classe.

En cas de diffusion, la fonction de phase ou indicatrice de diffusion décrit la probabilité de déviation du photon dans une direction donnée. Cette fonction de phase est fortement dépendante de la dimension des particules de brouillard (fig. 2).

Fig. 2 - Représentations en coordonnées polaires et échelles logarithmiques



a. Courbe de phase isotrope. Le photon a sensiblement la même probabilité d'être diffusé quelle que soit la direction.

b. Courbe de phase caractéristique d'une gouttelette de 5 μm de diamètre. La probabilité de diffusion vers l'avant est très importante, par contre, elle est minimum aux alentours de 90°.

Présentation des situations étudiées

Nous avons étudié le cas d'un conducteur placé au volant d'un véhicule, sur une route à deux voies en sens unique, avec une bande d'arrêt d'urgence. Le « temps de fixation », c'est-à-dire la durée moyenne pendant laquelle le regard se fixe sur un élément du paysage pour gérer sa conduite, est compris entre 200 et 500 ms. Pour être aisément sélectionné visuellement par le conducteur, cet élément doit donc avoir un niveau de visibilité (VL) compris entre 15 et 20. Dans nos calculs, sans en faire une référence absolue, nous avons choisi un niveau de visibilité de 15. La distance pour laquelle on obtiendra ce niveau de visibilité sera considérée comme étant la distance de visibilité.

* Courbes photométriques fournies par l'UTAC.

** Courbes photométriques fournies par le constructeur.

Pour permettre le calcul de la distance de visibilité, le programme calcule :

- la luminance de l'objet observé : L_o ,
- la luminance du fond : L_F ,
- la luminance d'adaptation : L_a .

Les objets cibles

Nous n'avons pas jugé nécessaire d'aborder l'étude de la visibilité de la signalisation horizontale ou verticale. En effet, dans le brouillard, il y a plus d'accidents par collision que par sortie de route. Les objets pris en compte sont donc des obstacles, objets ou véhicules. Le plus petit obstacle choisi est la roue de secours perdue sur la chaussée. Elle est représentée par un rectangle de 20 cm de haut et de 60 cm de long, de couleur noire (coefficient de réflexion de 10 %). Nous avons également étudié la visibilité de l'arrière d'un camion (3 m \times 2,5 m, coefficient de réflexion 30 %) dépourvu de feux rouges. Celui-ci n'étant jamais éclairé de façon homogène, nous avons étudié, de façon séparée, la visibilité des 80 cm inférieurs et des 2,20 m supérieurs.

Les sources de lumière

Du point de vue de l'éclairage, nous avons pris en compte trois situations :

➤ la première situation consiste à limiter l'éclairage à celui des feux de croisement du véhicule. Nous avons choisi des phares de 205 Peugeot* ;

➤ la deuxième situation représente une conduite avec les feux de croisement allumés, sur une route éclairée de façon classique, c'est-à-dire avec des luminaires (Europhane)** de type routier implantés sur le terre-plein central à gauche de la chaussée en sens unique :

- Puissance : 250 W (flux 26 000 lumens)
- Type : sodium haute pression (SHP)
- Hauteur de feux : 9 mètres
- Espacement des lampadaires : 36 mètres
- Inclinaison : 20°
- Avancée par rapport au bord de la chaussée : 0,75 mètre.

Avancée par rapport au bord de la chaussée : 0,75 m.

➤ La troisième situation comporte toujours le véhicule avec ses feux de croisement allumés se déplaçant sur une route éclairée par une installation dite « d'éclairage en nappe ». Celle-ci est constituée de projecteurs implantés sur le terre-plein central (462 lumens pour des espacements de 10 m) de façon à dispenser une nappe de lumière de 85 cm d'épaisseur moyenne au dessus de la route, les véhicules se trouvant éclairés de trois-quart par l'arrière [8].

Limites du milieu étudié

Le milieu étudié comporte bien évidemment l'observateur, les sources et l'objet cible. Il est limité à un parallélogramme de 400 m de long, 200 m de haut et 200 m de large dont la base est le sol supportant la chaussée. Tout photon dont la trajectoire calculée sort de ces limites disparaît. La surface horizontale supportant la chaussée est également absorbante, à l'exclusion de la chaussée elle-même, dont la portion prise en compte dans les calculs est lambertienne et a un coefficient de réflexion de 15 %.

Synthèse des résultats obtenus

Nous nous limiterons à la présentation de quelques résultats permettant d'illustrer la méthode utilisée et aux conclusions concernant la comparaison des performances en matière de visibilité des différents procédés d'éclairage pour le brouillard de granulométrie donnée figure 1.

Luminance de voile atmosphérique

L'importance de la luminance de voile dépend du nombre d'interactions, donc de la densité du brouillard, et du nombre de photons donc de la puissance des éclairages mis en jeu. Mais outre, le nombre d'interactions, la courbe de diffusion et la direction d'incidence du photon influent sur la direction de la lumière diffusée et, par voie de conséquence, pour une position d'observation donnée, sur la valeur de la luminance de voile. Quand il y a cumul des sources, c'est le cas de la conduite avec feux de croisement allumés sur une route éclairée par exemple, les luminances de voile s'ajoutent.

La figure 3 compare les luminances de voile calculées dans les situations les plus courantes (observateurs sur la voie de droite). Dans le cas des luminaires ou de l'éclairage en nappe, le fuseau de résultats est lié aux différences observées en fonction de la position de l'observateur par rapport aux installations. On constatera des différences très importantes entre les différents modes d'éclairage. La luminance de voile créée par les luminaires d'éclairage public est la plus importante puisqu'elle varie de 2 cd/m^2 à 11 cd/m^2 suivant la position de l'observateur, pour des concentrations de $0,5 \cdot 10^8$ gouttes/ m^3 à 10^9 gouttes/ m^3 . Ceci est dû à l'importance des flux lumineux et aux caractéristiques de l'installation (trajet de la lumière beaucoup plus grand qu'avec les autres procédés).

La luminance de voile créée par les phares du véhicule en position « feux de croisement » varie quant à elle de 0,2 à 1,4 cd/m^2 .

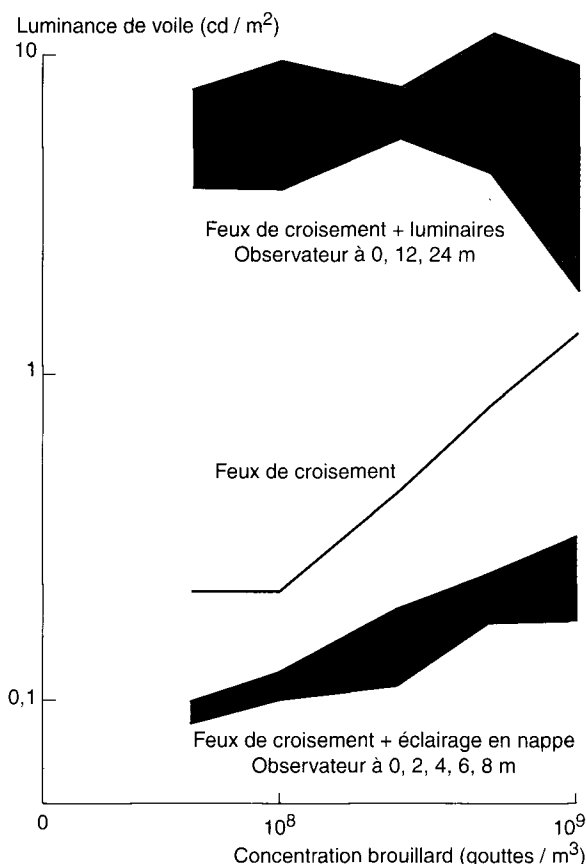


Fig. 3 - Variation de la luminance de voile atmosphérique en fonction du type de situation d'éclairage et de la concentration du brouillard.

Les projecteurs de l'installation d'éclairage en nappe donnent la luminance de voile la plus faible (de 0,10 à 0,30 cd/m^2). Ceci est dû à la puissance relativement réduite des sources, mais surtout au fait que l'incidence du photon sur les gouttes de brouillard est telle que la probabilité que la lumière soit diffusée vers l'œil du conducteur est relativement faible.

Distances de visibilité

On ne doit pas juger des performances d'un système d'éclairage dans le brouillard uniquement à partir de l'importance de la luminance de voile. Il faut également tenir compte du niveau d'éclairement qu'il crée sur l'objet. La distance de visibilité des objets dépend de ces deux paramètres. Rappelons que nous avons défini la distance de visibilité comme étant l'épaisseur de brouillard pour laquelle le niveau de visibilité de l'objet observé est égal à 15.

Il faut remarquer que, lorsque l'objet se déplace sur une route éclairée par des sources ponctuelles, son niveau d'éclairement varie. Il atteint un maximum lorsqu'il passe au droit d'une source, qu'il s'agisse d'un luminaire ou d'un projecteur. La luminance est donc modulée par des oscillations

correspondant à ce phénomène, dont la période est liée à l'espacement des sources. C'est ce qu'indique la figure 4. Dans le cas de cet exemple, la route est éclairée par des luminaires placés à une hauteur de 9 m. Le contraste (ΔL réel) de la partie supérieure du camion dans la voie de gauche varie alternativement à chaque passage au droit d'un luminaire. Le domaine de visibilité étant défini par la condition $\Delta L > 15 \Delta L_s$, pour un observateur fixe, au-delà d'une distance de 20 m, il devient invisible puis redevient visible de 38,75 m à 48,75 m pour disparaître ensuite définitivement.

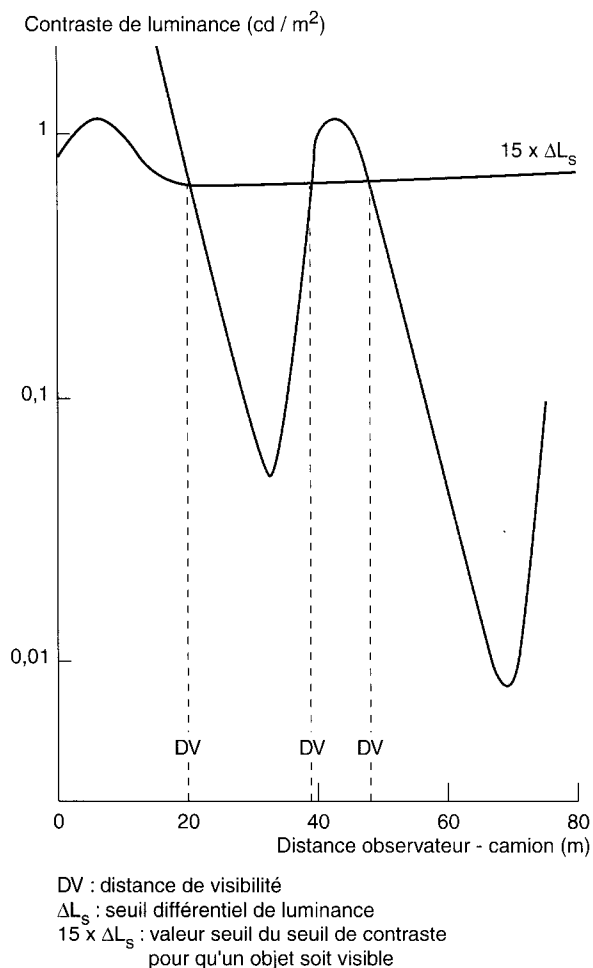


Fig. 4 - Modulation du contraste de luminance dans le cas d'une installation classique d'éclairage public. L'observateur fixe regarde la partie supérieure d'un camion qui s'éloigne.

La position de l'observateur module également la visibilité. Dans le cas de l'installation d'éclairage en nappe les calculs montrent que les distances de visibilité d'un pneu placé sur la voie de droite (où se situe l'observateur), varient de moins de 5 % quelle que soit la position de l'observateur. Sur la voie de gauche, l'écart n'excède pas 9 %. Les points de feux de l'installation d'éclairage classique étant plus éloignés l'un de l'autre, les variations de luminance d'adaptation dépendent fortement de la position de l'observateur. Sur la voie

de droite, pour une situation donnée, on peut obtenir des différences d'environ 20 % entre les distances de visibilité minimum et maximum. Sur la voie de gauche, les variations peuvent atteindre 40 % pour les situations où la concentration est la plus dense, ce qui correspond à des distances de visibilité de 8 m à 11 m.

Nous nous limiterons à détailler les résultats concernant deux situations typiques :

- conduite avec feux de croisement sur une route éclairée avec des luminaires placés à une hauteur de 9 m (fig. 5) ;
- conduite avec feux de croisement sur une route éclairée par des projecteurs en incidence rasante (éclairage en nappe) (fig. 6).

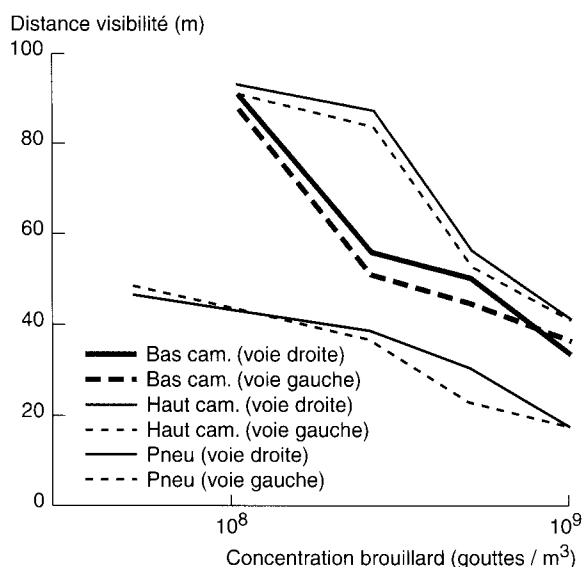


Fig. 5 - Variation de la distance de visibilité en fonction de la concentration du brouillard pour une distance conducteur-objet de 24 m.

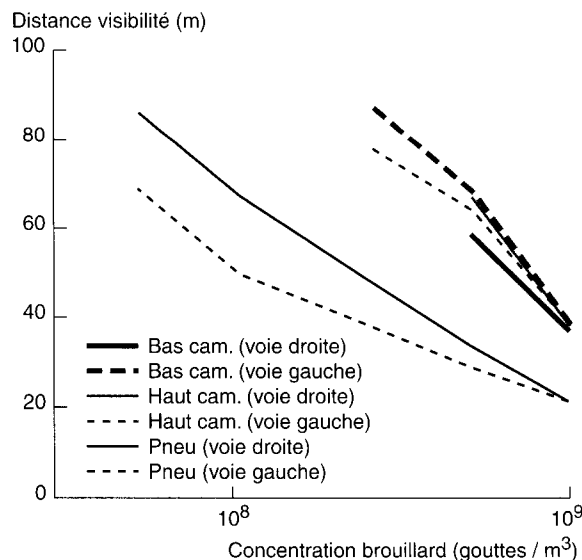


Fig. 6 - Variation de la distance de visibilité en fonction de la concentration du brouillard pour une distance conducteur-objet de 24 m. Les distances de visibilité non représentées sont supérieures à 100 mètres.

TABLEAU I
Valeurs de la distance de visibilité de différentes cibles dans diverses situations d'éclairage
dans un brouillard de concentration 5.10^8 gouttes par m^3

Situations d'éclairage	Position de l'observateur	Cibles					
		Pneu		Bas du camion		Haut du camion	
		Voie droite	Voie gauche	Voie droite	Voie gauche	Voie droite	Voie gauche
Phares en position feux de croisement		20 m	20 m	25 m	27 m	16 m	17 m
Éclairage en nappe uniquement	Au droit d'un projecteur	30 m	20 m	52 m	40 m 67 m	38 m 46 m	20 m 53 m
Éclairage en nappe et feux de croisement du véhicule	Au droit d'un projecteur	25 m	21 m	49 m	39 m 65 m	24 m	20 m 34 m
Éclairage classique avec luminaire à 9 m	Au droit d'un luminaire	10 m	12 m	19 m	19 m	19 m 46 m	20 m 38 m
Éclairage classique et feux de croisement du véhicule	Au droit d'un luminaire	15 m	16 m	21 m	21 m	18 m 46 m	20 m 37 m

Les résultats concernent un brouillard de concentration 5.10^8 gouttes par mètre cube. Les résultats sont synthétisés dans le tableau I, qui montre les différences entre les trois types d'éclairage.

La comparaison des deux situations indique un niveau de visibilité plus élevé dans le cas du système d'éclairage en nappe. Ces résultats sont dus au fait que les luminances de voile sont plus faibles dans le cas d'une installation d'éclairage en nappe (trajet source-cible plus court, flux réduit, etc.). L'éclairage en nappe augmente les distances de visibilité du pneu de 20 à 25 % sur la voie de gauche et les double sur la voie de droite, qui est caractérisée par une meilleure uniformité en éclairage vertical. La visibilité du bas du camion est augmentée de 10 à 15 % vers les concentrations moyennes. Par contre, le haut du camion n'est pas mieux vu. L'amélioration des performances est due à la diminution du trajet de la source à l'objet et à l'adaptation au bas niveau de luminance. La meilleure visibilité est donc assurée, pour les cibles basses, par le système d'éclairage en nappe. L'adjonction de la contribution des feux de croisement du véhicule détériore plutôt ces performances. L'éclairage classique par mâts de 9 m contribue efficacement à la visibilité des cibles hautes (haut de camion) et dans cette situation l'adjonction des feux de croisement améliore la visibilité des cibles basses.

Notons que la luminance d'adaptation est plus faible pour l'éclairage en nappe, ce qui entraîne une réduction de l'acuité visuelle, une diminution de la largeur du champ visuel et une plus mauvaise estimation des distances. À notre avis, les avantages l'emportent sur les inconvénients et ceci concourt à améliorer la sécurité de l'utilisateur.

Conclusions

L'étude comparative des deux installations montre que l'éclairage en nappe permet d'obtenir une meilleure visibilité des obstacles dans leurs parties basses, inférieures à 80 cm. Ce résultat est dû à la distance relativement réduite entre un obstacle et les projecteurs. Il y a alors une faible atténuation de l'éclairement sur l'obstacle, sa luminance intrinsèque reste élevée.

Une installation d'éclairage n'est pas universelle. En général, les géométries sont définies pour obtenir un niveau et une uniformité de luminance sur la chaussée, c'est-à-dire qu'elles sont, *a priori*, destinées à améliorer les contrastes des objets se détachant sur la chaussée, en particulier ceux des marquages. Ainsi, une installation d'éclairage classique dispense, en atmosphère claire, un éclairage vertical qui assure une très bonne visibilité des obstacles. Par contre, en présence de brouillard, une telle installation, si elle assure le guidage du conducteur grâce en particulier au halo créé autour des sources, ne répond plus de façon satisfaisante à la visibilité des obstacles. L'atténuation de l'éclairement vertical et l'augmentation de la luminance de voile réduisent notablement les contrastes. Dans les zones à brouillard, l'étude montre qu'il conviendrait d'approfondir la mise en œuvre d'installations spécifiques dont le rôle serait d'améliorer la visibilité des obstacles, plus que celle de l'itinéraire. De cette façon, la vitesse pratiquée par l'automobiliste serait plus en adéquation avec la distance de visibilité des obstacles. Les résultats de l'étude montrent que, pour obtenir satisfaction, il faut :

- réduire les distances entre sources et obstacles,
- favoriser l'éclairement vertical sur les obstacles.

- trouver une valeur de la luminance d'adaptation pour avoir un compromis satisfaisant entre l'obtention d'un seuil différentiel de luminance élevé et une acuité visuelle ainsi qu'une sensibilité au contraste satisfaisantes,
- choisir la direction et l'ouverture du flux émis de façon à réduire la probabilité de diffusion de la lumière vers l'œil de l'observateur.

Des installations tendant à répondre avec plus ou moins de réussite à ces critères ont été déjà mises en place : éclairage de l'autoroute du Nord dans la vallée de la Scarpe, éclairage par des pro-

jecteurs installés à 2 ou 3 m de hauteur, ou des luminaires éclairant en plongée, vers l'arrière des véhicules, au Japon.

La méthode, décrite dans ce texte, permet de comparer les différents procédés. Actuellement, les distances de visibilité obtenues ont des ordres de grandeurs réalistes mais ne permettent que des comparaisons entre les installations. Nous envisageons d'expérimenter des situations types dans des salles de brouillard pour valider la méthode et obtenir des résultats plus proches des valeurs réelles.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- | | |
|---|---|
| <p>[1] ADRIAN W. (1989), <i>Visibility of targets: model of calculation</i>, Lighting research and technology, june.</p> <p>[2] LECOQ J., Sté Europhane (1994), Niveaux de visibilité en éclairage public. Modèle d'Adrian appliqué aux cibles hémisphériques, revue <i>LUX</i>, 168.</p> <p>[3] MÉNARD J., CARIOU J. (1993), <i>Characterisation of a street lighting installation based on the contrast of a standardized target</i>, Lighting research and technology, november.</p> | <p>[4] BRETON J.-P., MAHEU B., GREHAN G., GOUESBET G. (1992), <i>Monte Carlo simulation of multiple scattering in arbitrary 3-D geometry</i>, Part. Part. Syst Charact 9, pp. 52-58.</p> <p>[5] MONTEL M.-C. (1992), <i>Éclairage public et accidents piétons</i>, Rapport interne CETE Normandie-Centre.</p> <p>[6] GALLAGER, MEGUIR (1975), <i>Contrast requirements of urban driving</i>, Transportation Research Board Special Report (156) Washington.</p> |
|---|---|

ABSTRACT

A theoretical study of the influence of lighting on visibility in fog

B. MAHEU - C. ROZÉ - Th. GIRASOLE - J. MÉNARD

Driving in fog is greatly influenced by the visibility of the signs which are normally used for reference points. At night-time it has been observed that drivers often use the vehicle in front of them as a reference point. For this reason we have studied the visibility distance of a rear light in the absence of and in the presence of two types of lighting.

The first section of the paper outlines the theoretical basis. It begins with a summary of our knowledge in the area of night vision. It is based upon the Adrian model, which uses data from a "Monte Carlo" type simulation technique. This model computes the path of light with reference to the diffusion of light by fog particles.

The second part describes the different types of lighting which were considered in the study and compares the visibility distances which were computed for each set of conditions.