

**Efficacité des stroboscopes pour assurer la visibilité
des autobus scolaires en cas de brouillard intense,
dans la région de Saint-Tite-des-Caps
(R644.1)**

Simon Thibault, M. Sc., Ph. D., ing.
Professeur adjoint
Département de physique, de génie physique et d'optique
Université Laval

Réalisé pour le compte du ministère des Transports
Direction du transport terrestre des personnes
Service du conseil et du soutien aux partenaires

Juin 2010

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports du Québec et a été financée par la Direction du transport terrestre des personnes. Cette étude est présentée à M. Mahamadou Sissoko, ing. jr, MBA, membre du service du conseil et du soutien aux partenaires.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports du Québec.

Autres auteurs :

Sébastien Bouchard, étudiant, Université Laval

Marie-Pierre Côté, étudiante, Université Laval

Pierre Désaulniers, M. Sc., professionnel de recherche, Université Laval

Hugo Lemieux, étudiant, Université Laval

Personne-ressource :

Simon Thibault, M. Sc., Ph. D., ing.

Professeur adjoint

Département de physique, de génie physique et d'optique

Pavillon d'optique-photonique

Université Laval

2375, rue de la Terrasse, bureau 2145

Québec (Québec) G1V 0A6

418 656-2131, poste 12766

simon.thibault@phy.ulaval.ca

SOMMAIRE

La route 138 dans le secteur de Saint-Tite-des-Caps subit des périodes de brouillard intense sur une distance évaluée à un peu plus de 18 kilomètres^[1]. La Municipalité régionale de comté de La Côte-de-Beaupré et la Municipalité de Saint-Tite-des-Caps ont demandé au Comité sur la sécurité du transport des élèves (CSTE) que soit permise l'utilisation de stroboscopes sur les autobus scolaires effectuant les circuits sur la route 138, et ce, en cas de brouillard seulement.

Le ministère des Transports du Québec (MTQ) doit, avant de réglementer ou de recommander un tel équipement, vérifier la fiabilité et l'efficacité de ce type d'éclairage pour assurer la visibilité des autobus scolaires dans des situations de très haute densité de brouillard.

Pour répondre objectivement à ces questions, le groupe de recherche en ingénierie optique de l'Université Laval (lrio.copl.ulaval.ca) a mis au point une approche permettant une évaluation quantitative de l'efficacité de ce type d'éclairage. Compte tenu du fait qu'il importe de déterminer dans quelle mesure un stroboscope permettrait d'augmenter la visibilité, les conditions de brouillard présentes sur le terrain ont été reproduites en laboratoire. Le banc de mesure a été mis en place avec la collaboration du Département de génie mécanique de l'Université Laval qui possède un générateur de brume Antari (modèle Z-1200 DMX Fog Machine, www.instrumentpro.com/P-ANTZ1200). Ce générateur commercial permet de produire une brume en chauffant une solution particulière à base d'eau. La brume ainsi générée a des caractéristiques similaires à celles de la brume naturelle. Cette brume est dirigée et maintenue dans une enceinte, ce qui permet de mesurer la photométrie de la lampe à travers la brume. L'intensité de la lumière est alors enregistrée en fonction de la densité de la brume. Une mesure de transmission à l'aide d'une source de référence permet d'estimer alors le coefficient d'atténuation de la brume qui est relié à la distance de visibilité. Les mesures en laboratoire ont permis d'établir un modèle valable de visibilité, de calibrer le banc de mesure selon la nature du brouillard de la zone de référence et d'établir la visibilité d'un stroboscope en fonction du brouillard. Des mesures en lumière spéculaire et diffuse ont également été réalisées pour établir tous les modes possibles de transmission dans le brouillard.

Nous avons mis en évidence qu'une cible en condition de brouillard pourrait n'être visible que par ses feux lumineux, particulièrement lorsque le

rayonnement de fond est faible. Les résultats expérimentaux montrent que pour une intensité égale, la lumière diffuse pénètre plus loin dans le brouillard que la lumière spéculaire. La couleur de la lumière n'est pas un facteur déterminant pour la visibilité dans le brouillard. Par contre, les résultats expérimentaux ne permettent pas de conclure et d'établir une fréquence du stroboscope ainsi que la position de celui-ci sur l'autobus permettant d'augmenter la visibilité dans le brouillard. Finalement, les résultats expérimentaux nous ont permis de simuler le comportement en condition de visibilité équivalant à une distance de visibilité égale à la distance de freinage de type A et de montrer l'augmentation de la distance de visibilité en utilisant un stroboscope. Bien que l'ensemble de nos travaux ne puisse pas établir l'intensité minimale requise par le stroboscope pour qu'il soit visible, il est clair que l'ajout d'un stroboscope conforme à la norme canadienne (CSA D250-07) augmentera la distance de visibilité dans le brouillard.

Nous avons également relevé des pistes d'études supplémentaires. Ainsi, il serait intéressant de pousser les recherches pour établir et modéliser les mécanismes de diffusion de la lumière dans le brouillard, étudier l'impact du rayonnement de fond en période de brouillard ainsi que l'impact de la couleur en utilisant des sources à spectre plus étroit.

SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATION

Cette recherche nous permet de conclure que l'ajout d'un stroboscope conforme à la norme canadienne (CSA D250-07) permet d'augmenter la distance de visibilité dans les épisodes de brouillard.

L'ajout d'un stroboscope sur l'autobus augmentera la distance de visibilité dans le brouillard, notamment à cause des deux éléments suivants :

- L'autobus en condition de brouillard pourrait n'être visible que par ses feux lumineux, particulièrement lorsque le rayonnement de fond est faible.
- Les résultats expérimentaux montrent que pour une intensité égale, la lumière diffuse pénètre plus loin dans le brouillard (distance de visibilité plus grande) que la lumière spéculaire. Le stroboscope produit plus de lumière diffuse qu'un feu standard.

Cette étude permet de soutenir la recommandation suivante, soit de procéder à l'ajout d'un stroboscope conforme à la norme canadienne (CSA D250-07) afin d'augmenter la distance de visibilité de l'autobus scolaire dans les épisodes de brouillard.

Table des matières

Sommaire	4
Synthèse des conclusions et recommandation	6
Liste des figures	8
1 Introduction	10
1.1 Contexte	10
2 PROBLÉMATIQUE	11
3 MÉTHODOLOGIE	12
3.1 Équipements expérimentaux	12
3.2 Densité de brouillard et mesures	17
3.3 Procédure expérimentale.....	18
4 ANALYSE DES RÉSULTATS	21
5 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	29
5.1 Commentaires sur la visibilité dans le brouillard.....	29
5.2 Position de la lampe sur le véhicule	31
5.3 Modèle mathématique, ajout d'un stroboscope ou d'un feu	31
5.4 La lumière diffuse par opposition à la lumière spéculaire.....	33
6 MISE EN ŒUVRE	38
7 CONCLUSION et recommandation	39
Références bibliographiques.....	41
Tableau 1 Liste des sources analysées lors de l'expérimentation	16
Tableau 2 Facteurs entre stroboscopes et lampes fixes	22

Liste des figures

Figure 1 Cloison vue de face	12
Figure 2 Cloison vue d'une de ses extrémités	13
Figure 3 Support pour les détecteurs	14
Figure 4 Support pour la source	15
Figure 5 Machine à brouillard Z-1200 DMX Fogger de la compagnie Antari	16
Figure 6 Montage expérimental complet	17
Figure 7 Dispersion des résultats (40 % d'atténuation de la référence) ..	21
Figure 8 Écart type pour les mesures sur le feu orange (spéculaire) en fonction de la transmission dans le brouillard	22
Figure 9 Éclairement diffus – feu orange	23
Figure 10 Éclairement diffus – feu rouge	23
Figure 11 Éclairement diffus – stroboscope Star Headlight	23
Figure 12 Éclairement diffus – stroboscope Grote	24
Figure 13 Éclairement spéculaire – feu orange	24
Figure 14 Éclairement spéculaire – feu rouge	24
Figure 15 Éclairement spéculaire – stroboscope Star Headlight	25
Figure 16 Éclairement spéculaire – stroboscope Grote	25
Figure 17 Comparaison des quatre sources en transmission diffuse	26
Figure 18 Comparaison des quatre sources en transmission spéculaire	26
Figure 19 Comparaison entre la transmission diffuse et la transmission spéculaire du feu orange	27
Figure 20 Comparaison entre la transmission diffuse et la transmission spéculaire du feu rouge	27
Figure 21 Comparaison entre la transmission diffuse et la transmission spéculaire du stroboscope Star Headlight	28
Figure 22 Comparaison entre la transmission diffuse et la transmission spéculaire du stroboscope Grote	28
Figure 23 Visibilité dans le brouillard de jour (visibilité 100 m)	29
Figure 24 Visibilité dans le brouillard de nuit (visibilité 100 m)	30
Figure 25 Gain de visibilité par l'ajout d'une lampe	33
Figure 26 Comparaison des quatre sources lumineuses en transmission spéculaire	34
Figure 27 Comparaison des quatre sources lumineuses en transmission diffuse	35
Figure 28 Stroboscope Grote dans le brouillard ayant une distance de visibilité de type A (210 m)	37

**Figure 29 Stroboscope Star Headlight dans le brouillard ayant une
distance de visibilité de type A (210 m)..... 37**

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

La route 138 dans le secteur de Saint-Tite-des-Caps subit des périodes de brouillard intense sur une distance évaluée à un peu plus de 18 kilomètres^[1]. La Municipalité régionale de comté de la Côte-de-Beaupré et la Municipalité de Saint-Tite-des-Caps ont demandé au Comité sur la sécurité du transport des élèves (CSTE) que soit permise l'utilisation de stroboscopes sur les autobus scolaires effectuant les circuits sur la route 138, et ce, en cas de brouillard seulement.

Compte tenu de la situation fortement à risque qui découle de l'opacité des brumes et du fait que des carambolages sont même survenus, le ministère des Transports du Québec (MTQ) doit, avant de réglementer ou de recommander un tel équipement, vérifier la fiabilité et l'efficacité de ce type d'éclairage pour assurer la visibilité des autobus scolaires dans des situations de très haute densité de brouillard.

La recherche devra permettre d'établir dans une certaine mesure la position sur le véhicule, la couleur des feux et l'intensité lumineuse nécessaire pour assurer la visibilité des autobus scolaires en cas de brouillard intense tout en tenant compte des distances de freinage et de la distance d'anticipation de freinage (chapitre 7 « Distance de visibilité » du *Tome I – Conception routière* de la collection Normes – Ouvrages routiers du MTQ).

Ce rapport décrit sommairement le montage en laboratoire, y inclus les composantes permettant la reproduction des mesures. Tous les calculs, facteurs de conversion ou autres éléments mathématiques sont inclus et expliqués. Le rapport présente les résultats des mesures ainsi que leur analyse. Enfin, ce rapport fait des constats qui ressortent des analyses.

2 PROBLÉMATIQUE

Les autobus scolaires sont munis d'un équipement de sécurité constitué notamment de feux rouges intermittents, deux à l'avant et deux à l'arrière, qui doivent être visibles le jour à une distance d'au moins 150 mètres. Les autobus scolaires doivent également être munis de feux jaunes d'avertissement alternatifs qui avisent les usagers de la route que l'autobus s'apprête à arrêter. Ces feux doivent être conçus selon les mêmes dispositions que celles applicables aux feux rouges intermittents.

Or, durant les périodes de brouillard intense, la distance de visibilité requise n'est évidemment plus respectée. Selon un relevé effectué et s'échelonnant du 18 septembre 2006 au 25 août 2008, plus de 140 périodes ayant connu une visibilité de moins de 150 mètres ont été enregistrées. Dans près de 75 % de ces cas, on a enregistré une visibilité de moins de 120 mètres, dont 36 % où la visibilité était de moins de 80 mètres.

Par ailleurs, des normes québécoises et nord-américaines existent quant à la luminosité des modules à diodes électroluminescentes pour signaux lumineux (chapitre 8 « Matériaux électriques », norme 8403, du *Tome VII – Matériaux*) et des gyrophares pour la signalisation des travaux (chapitre 4 « Travaux » du *Tome V – Signalisation routière*, et norme SAE J845 spécifiquement pour les véhicules légers), ou autres lumières d'avertissement pour les véhicules d'urgence (norme SAE J2498). Aucune par contre n'a été recensée quant à la visibilité que devrait avoir un stroboscope dans le brouillard nonobstant la norme CSA D250-07. En effet, bien que cette norme précise les caractéristiques que doivent respecter les lampes stroboscopiques installées sur les autobus scolaires, cette norme n'est pas obligatoire au Québec et n'a pas pour objectif de rendre l'autobus visible dans le brouillard mais plutôt de signaler la présence d'élèves à bord des autobus scolaires comme en Saskatchewan.

3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Équipements expérimentaux

Afin de reproduire les conditions naturelles de brouillard qu'on trouve dans la région de Saint-Tite-des-Caps, il a été nécessaire de construire une cloison pour retenir le brouillard artificiel. Le schéma de cette cloison est présenté aux figures 1 et 2.

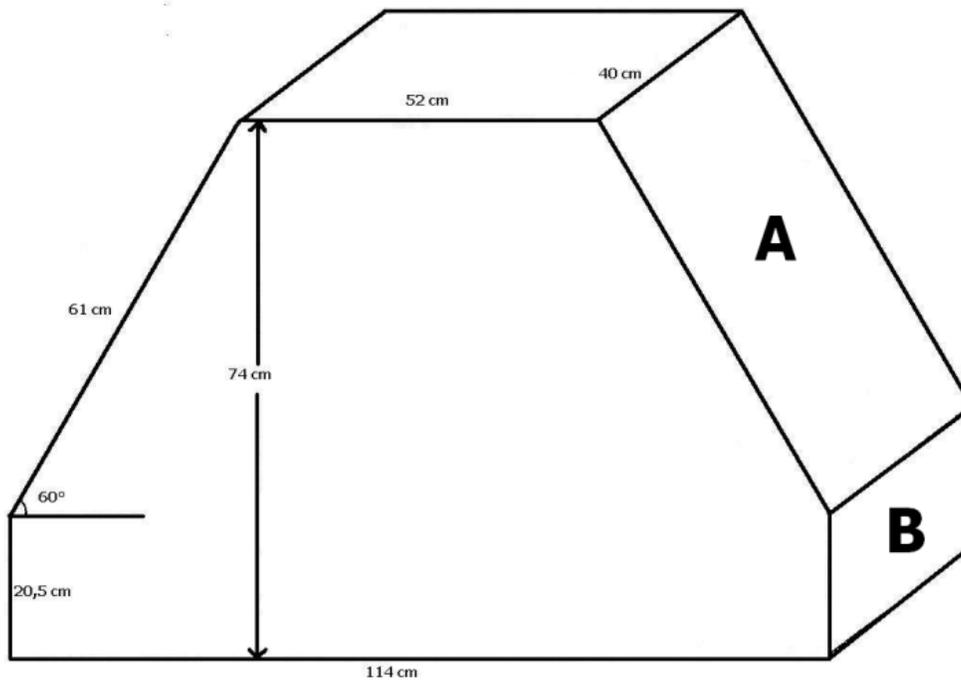


Figure 1 Cloison vue de face

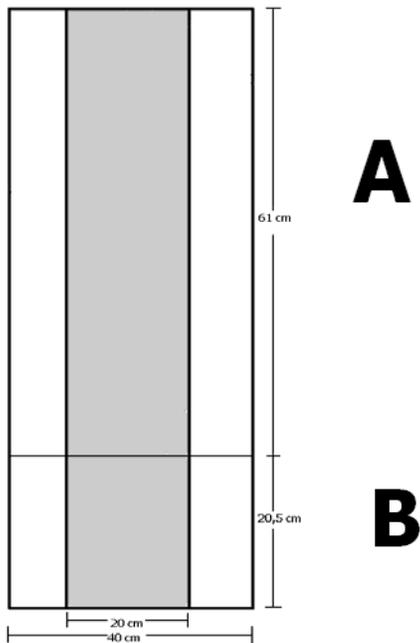


Figure 2 Cloison vue d'une de ses extrémités

Cette cloison fermée permet de retenir le brouillard artificiel tout en permettant de moduler la transmission du brouillard. Pour une densité de brouillard uniforme à l'intérieur de la boîte, la transmission dans la partie étroite (partie A) est plus élevée que dans la partie basse (B).

Nous assumons pour la suite que la densité du brouillard peut être déterminée et contrôlée par le coefficient d'atténuation de la lumière transmise à travers le brouillard (I_0 initiale et I après atténuation). La transmission étant donnée par l'équation suivante :

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-K \cdot L}$$

où K est le coefficient d'atténuation et L la distance parcourue par la lumière dans la boîte.

A cet effet, les deux extrémités de la cloison possèdent des fenêtres de plexiglas nous permettant de placer les instruments de mesure à l'extérieur de celle-ci. C'est important parce que bien que le brouillard artificiel soit fait d'une

solution à base d'eau il peut laisser de petits dépôts gras après plusieurs expositions. Les sources, soit une lampe halogène servant de référence et les différentes sources à analyser, sont placées à une extrémité de la cloison alors que les détecteurs sont placés à l'autre bout, à la même hauteur que les sources. Les détecteurs et la source de référence sont installés sur des supports permettant d'en ajuster la hauteur tout en les gardant verticaux. Ces supports sont présentés aux figures 3 et 4.



Figure 3 Support pour les détecteurs



Figure 4 Support pour la source

Afin d'éviter le plus de réflexion possible à l'intérieur de la cloison, toutes les parois intérieures ont été peintes avec de la peinture noire tout usage au fini mat (Rust-Oleum, Painter's Touch). Toujours pour la même raison, les fenêtres sont aussi étroites que possible tout en ayant une largeur couvrant toutes les sources à analyser.

Pour ce qui est du brouillard, il est injecté par une entrée placée dans le bas d'une face trapézoïdale en passant d'abord par un tuyau souple ayant un diamètre supérieur à celui de la machine à brouillard afin de réduire sa poussée à l'entrée de la cloison. Onze trous pouvant être fermés sont présents sur chaque face trapézoïdale afin de laisser s'échapper le brouillard tout en contrôlant le débit de sortie, ce qui permet un meilleur contrôle de l'uniformité du brouillard dans la boîte. Nous avons pu ainsi générer des densités de brouillard (transmission) de 10 % à 100 % par incrément de 10 %. La cloison est placée en partie dans une hotte chimique qui aspire tout le brouillard s'échappant de la cloison.

Le brouillard artificiel est créé à l'aide d'une machine à brouillard Antari Z-1200 DMX Fogger utilisant une solution à base d'eau chauffée. Cette machine est montrée à la figure 5.



Figure 5 Machine à brouillard Z-1200 DMX Fogger de la compagnie Antari

Quatre sources lumineuses ont été sélectionnées (avec le concours du MTQ) afin d'être analysées, soit deux stroboscopes des compagnies Star Headlight et Grote, un feu rouge intermittent et un feu jaune d'avertissement alternatif standard.

Tableau 1 Liste des sources analysées lors de l'expérimentation

Nom	No. de pièce	Puissance (watts)
Stroboscope classe 2	Star Headlight : 240SFD	24
Stroboscope classe 1	Grote : 77611	35
Feux rouges intermittents	Girardin : 27E0069	55
Feux orange d'avertissement alternatifs standards	Girardin : 27E0068	55

Sources : Spécifications des fabricants.

Voici le montage final utilisé avec les sources placées à gauche et les détecteurs placés à droite de la cloison, sous la hotte.



Figure 6 Montage expérimental complet

3.2 Densité de brouillard et mesures

Effectuer des expériences en condition réelle de brouillard n'est pas chose facile à cause de la nature imprévisible de celui-ci. C'est dans cet esprit que nous avons mis au point l'expérience dans nos laboratoires. Le but est de générer différentes densités de brouillard stable dans le temps. Dans cette étape, nous avons utilisé une source de lumière et un photomètre pour mesurer la densité du brouillard.

Plusieurs tests ont été nécessaires afin de trouver un équilibre entre la stabilité du brouillard et sa densité en fonction du volume de brouillard généré par le générateur. Il est cependant difficile de décrire exactement les requis sur le débit de brouillard, le choix des ouvertures (ouvert ou fermé) sur la boîte, le débit de la hotte. Cependant, nous pouvons affirmer que la mesure de la transmission est une méthode fiable.

Même s'il nous a été possible de produire presque toutes les densités de brouillard désirées, nous avons déterminé que pour nos besoins des facteurs de transmission de 10 % à 100 % par incrément de 10 % seraient suffisants.

Pour la source de référence, nous avons par exemple obtenu un éclairage de 1520 lx¹, 1368 lx, 1216 lx, 1064 lx, 912 lx, 760 lx, 608 lx, 456 lx, 304 lx et 152 lx en fonction de la densité de brouillard. La précision du photomètre ILT1700 (International Light) est de +/- 0,1 % pour les échelles de mesure utilisées.

Nous avons évalué la stabilité de l'éclairage de la source de référence et donc de la stabilité du brouillard à 2 % sur le temps de mesure.

3.3 Procédure expérimentale

La source à analyser est placée sur son support le plus bas possible le long de la face inclinée d'une des extrémités et la source de référence est placée directement devant la fenêtre verticale de cette même extrémité. Dans la hotte un détecteur, qu'on appellera détecteur d'analyse, est installé à la même hauteur que la source à analyser et l'autre, qu'on appellera détecteur de référence, est installé devant la source de référence. La cloison est placée à cheval entre la hotte chimique et une table de même hauteur et les autres appareils, tels la source de courant, la machine à brouillard et le boîtier des détecteurs, sont placés sur une table à côté.

L'objectif est de mesurer la transmission de chacune des lampes aux mêmes densités de brouillard. Pour ce faire, leur transmission est mesurée à certaines valeurs données de transmission de la source de référence. Il est important de noter que deux détecteurs sont utilisés sur un même boîtier; ils ne sont donc branchés que lorsqu'ils sont utilisés à tour de rôle. Nous nous servons du détecteur d'analyse seulement lorsque la source à analyser est ouverte et nous employons le détecteur de référence seulement lorsque la source de référence est ouverte. Les changements de détecteurs ne seront donc pas mentionnés dans les manipulations.

¹ Lux – unité de mesure de l'éclairage tenant compte de la réponse spectrale de l'œil.

Voici les étapes à réaliser :

1. Le détecteur d'analyse est branché et mis à zéro sans source ouverte.
2. La source à analyser est ouverte et la transmission est mesurée et prise en note.
3. La source à analyser est fermée et celle de référence est ouverte. La transmission est mesurée et prise en note.
4. La cloison est remplie de brouillard jusqu'à ce que la transmission de la source de référence soit minimale.
5. Des mesures de transmission sont prises automatiquement toutes les demi-secondes.
6. Quand la transmission atteint 10 % de la transmission maximale de la source de référence, cette source est éteinte et la source à analyser est ouverte. La transmission est mesurée et prise en note.
7. La source à analyser est éteinte et celle de référence est remise en marche.
8. Les étapes 5 à 7 sont répétées quand la transmission de la source de référence atteint 20, 30, 40... jusqu'à 90 % de sa valeur maximale.
9. Les étapes 1 à 8 sont refaites en plaçant un tube de 43 centimètres de longueur et de 2 centimètres de diamètre devant le détecteur d'analyse. Ce tube permet de ne voir que la lumière transmise directement de la source sans voir la lumière diffusée dans les particules de brouillard environnantes.
10. Les résultats des mesures sont compilés dans des graphiques.

Lorsque les feux sont analysés, les mesures de transmission sont lues directement sur le boîtier des détecteurs et la lecture est en lux. Cette lecture est en fait une intégration sur une demi-seconde. Par contre, lorsque les stroboscopes sont analysés, une intégration sur 10 pulsations est effectuée. La lecture obtenue est donc en lux-secondes. Afin de pouvoir comparer les résultats entre eux, les lectures des stroboscopes sont divisées par le temps d'intégration en secondes. Aussi, les stroboscopes ne sont allumés qu'une fraction de ce temps d'intégration, mais la moyenne est faite sur toute la période. Donc, les mesures doivent également être multipliées par un facteur afin de corriger cette situation.

L'expérience se déroule en nous assurant que les détecteurs ne mesurent que l'éclairage de la lampe à mesurer. Nous établissons donc un zéro pour nous assurer qu'aucune contamination de la mesure n'est faite par la lumière ambiante. Il faut noter que des caches sont disposées de part et d'autre des détecteurs pour garantir une immunité à la lumière ambiante. Malgré ces

précautions, nous maintenons l'éclairage ambiant au minimum sans variation lors des mesures.

Nous avons fait deux types de mesures. La première avec le détecteur placé devant la fenêtre, ce qui nous a permis d'intégrer la lumière envoyée par la source dans le brouillard qui retourne vers le détecteur après diffusion (lumière diffuse) et la lumière qui provient directement de la source (parcours primaire ou lumière spéculaire). Pour chaque type de mesure, nous avons fait de quatre à cinq mesures.

4 ANALYSE DES RÉSULTATS

La dispersion ou la variation des mesures peut être estimée en termes de déviation standard. Comme exemple, la déviation standard autour de la moyenne (cinq échantillons) en ce qui concerne les mesures de l'éclairage de chaque lampe pour les deux types de mesures est montrée à la figure 7. Les résultats sont présentés pour une atténuation du signal de référence de 40 % (ou 60 % de transmission de la référence). La figure 8 indique l'écart type des mesures pour le feu orange (spéculaire) en ce qui a trait à l'ensemble de la plage d'atténuation ou de la densité du brouillard.

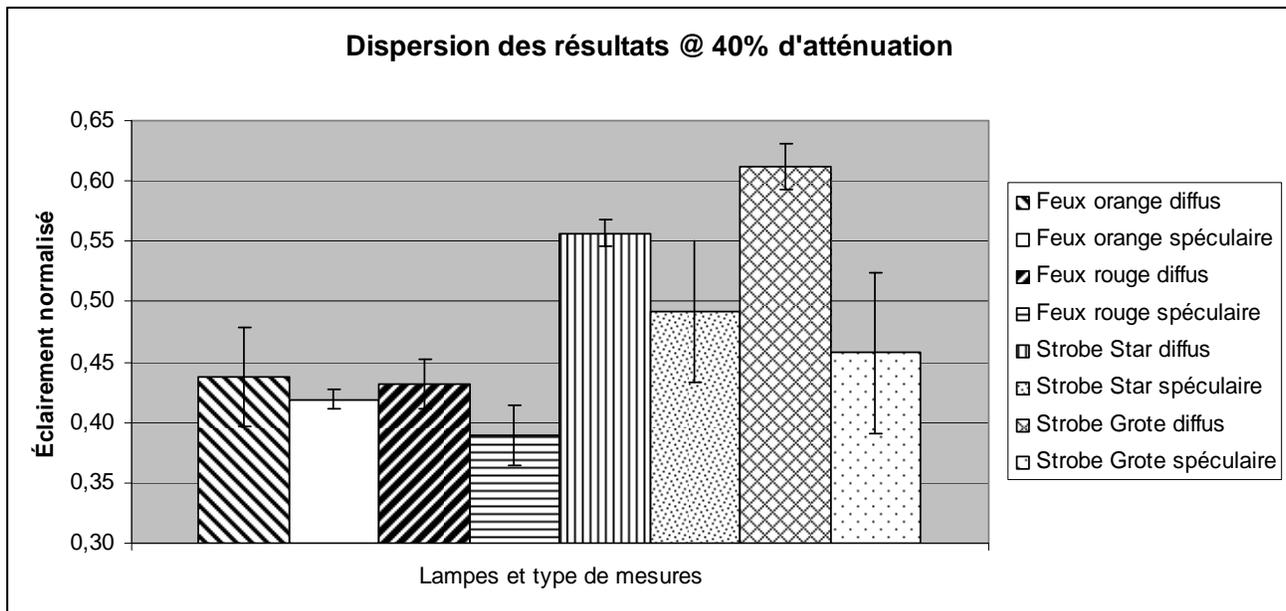


Figure 7 Dispersion des résultats (40 % d'atténuation de la référence)

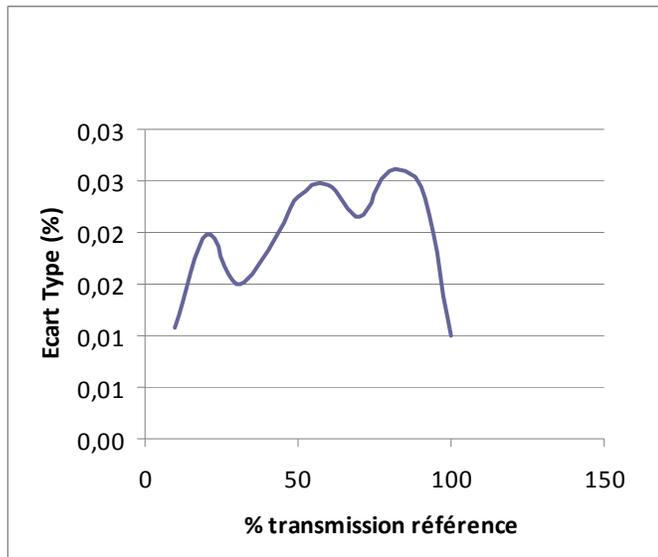


Figure 8 Écart type pour les mesures sur le feu orange (spéculaire) en fonction de la transmission dans le brouillard

Les résultats pour chacune des quatre lampes sont présentés aux figures 9 à 16. Les graphiques montrent la valeur moyenne ainsi qu'une approximation exponentielle de la courbe. Il faut noter ici que l'approximation exponentielle n'est donnée qu'à titre indicatif. Les figures 9 à 12 présentent les résultats diffus tandis que les figures 13 à 16 montrent les résultats dans la direction spéculaire (parcours primaire).

Pour les stroboscopes, les résultats ont été divisés par le temps d'intégration et par l'intervalle sur lequel le stroboscope est allumé (*Duty Cycle*). Ainsi, ils pourront être comparés avec les lampes fixes (feux orange et rouges).

Tableau 2 Facteurs entre stroboscopes et lampes fixes

Marque	Temps d'intégration du détecteur (s)	<i>Duty Cycle</i> (%)	Facteur multiplicatif
Star Headlight	10	10	1
Grote	7	36	2.77

Il faut noter que les résultats sont des données brutes qui seront normalisées dans la section analyse.

EFFICACITÉ DES STROBOSCOPES POUR ASSURER LA VISIBILITÉ DES AUTOBUS SCOLAIRES EN CAS DE BROUILLARD INTENSE, DANS LA RÉGION DE SAINT-TITE-DES-CAPS (R644.1)

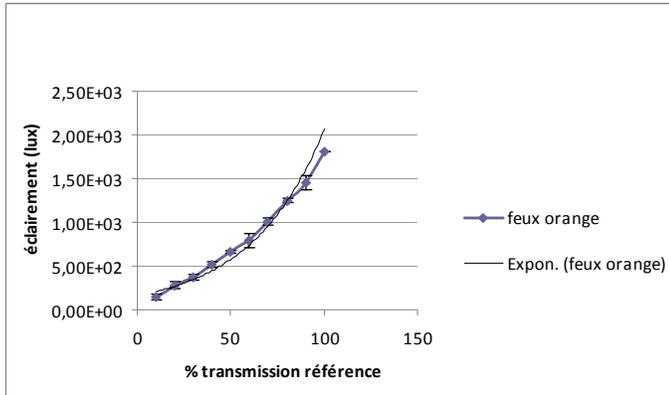


Figure 9 Éclairage diffus – feu orange

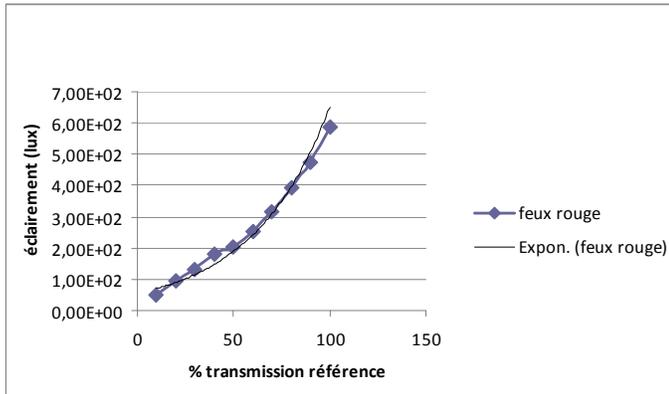


Figure 10 Éclairage diffus – feu rouge

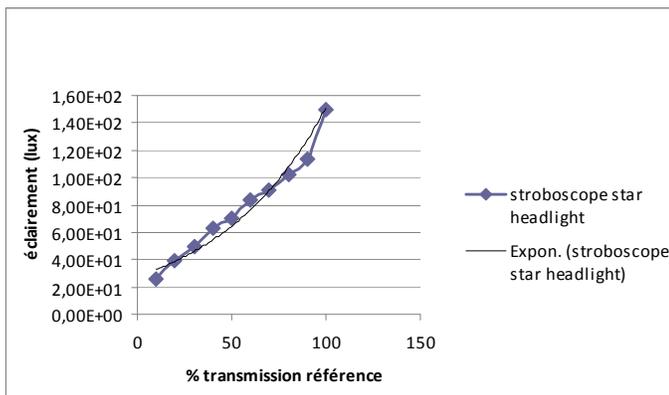


Figure 11 Éclairage diffus – stroboscope Star Headlight

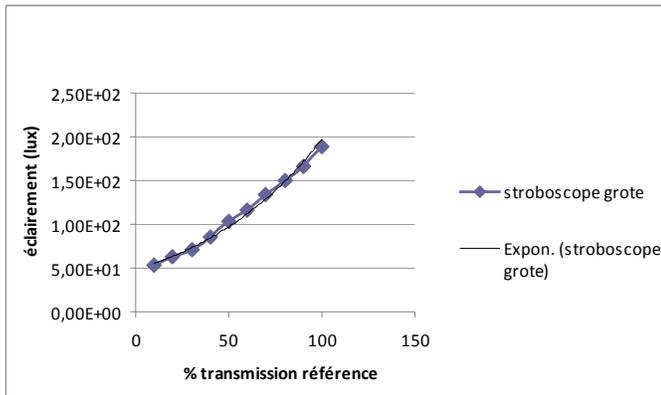


Figure 12 Éclairage diffus – stroboscope Grote

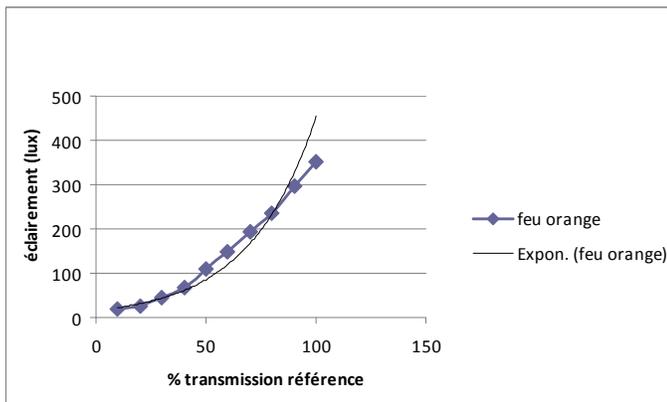


Figure 13 Éclairage spéculaire – feu orange

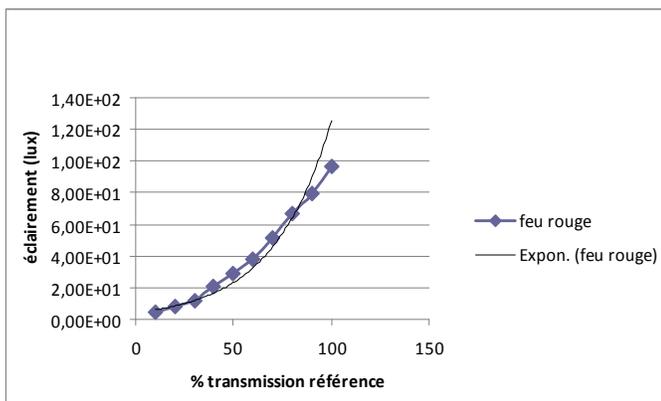


Figure 14 Éclairage spéculaire – feu rouge

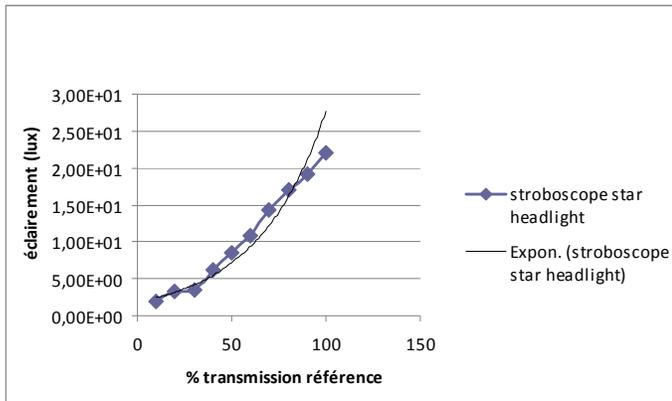


Figure 15 Éclairage spéculaire – stroboscope Star Headlight

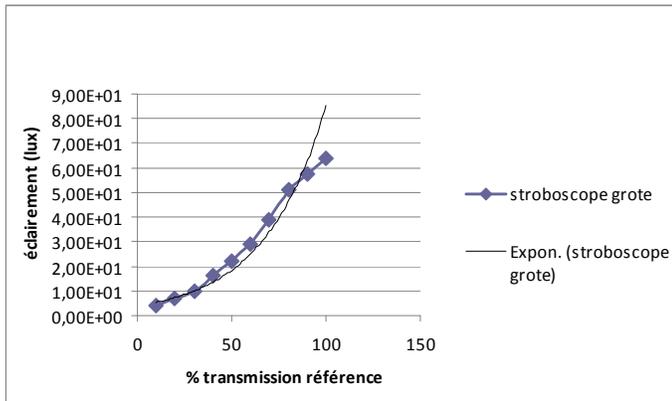


Figure 16 Éclairage spéculaire – stroboscope Grote

Les figures 17 à 22 présentent les résultats synthèses des valeurs expérimentales prises lors de nos mesures.

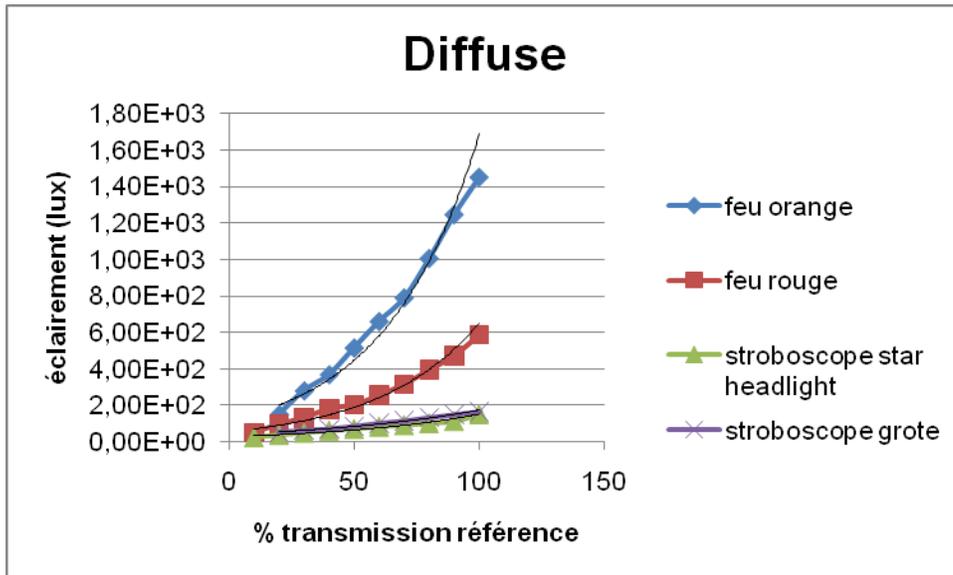


Figure 17 Comparaison des quatre sources en transmission diffuse

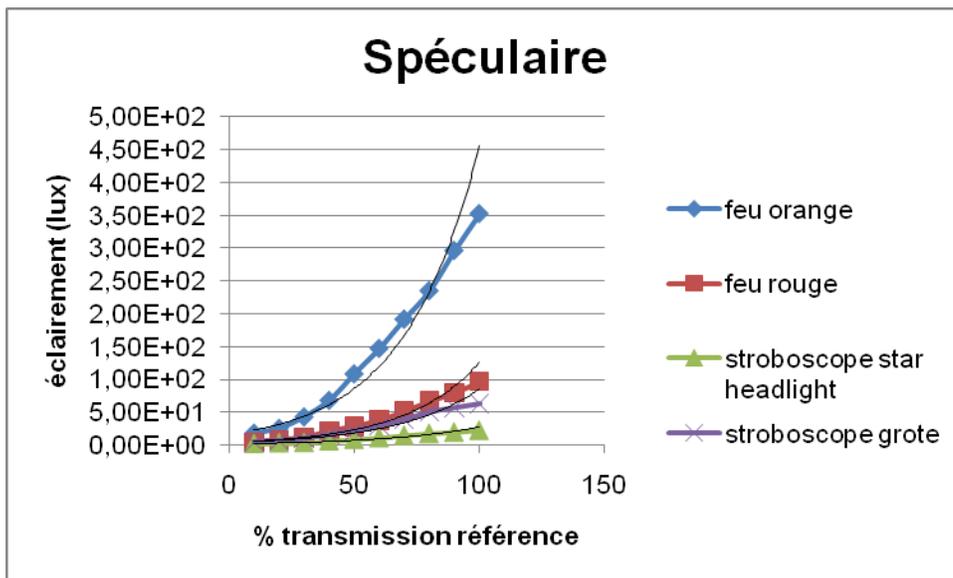


Figure 18 Comparaison des quatre sources en transmission spéculaire

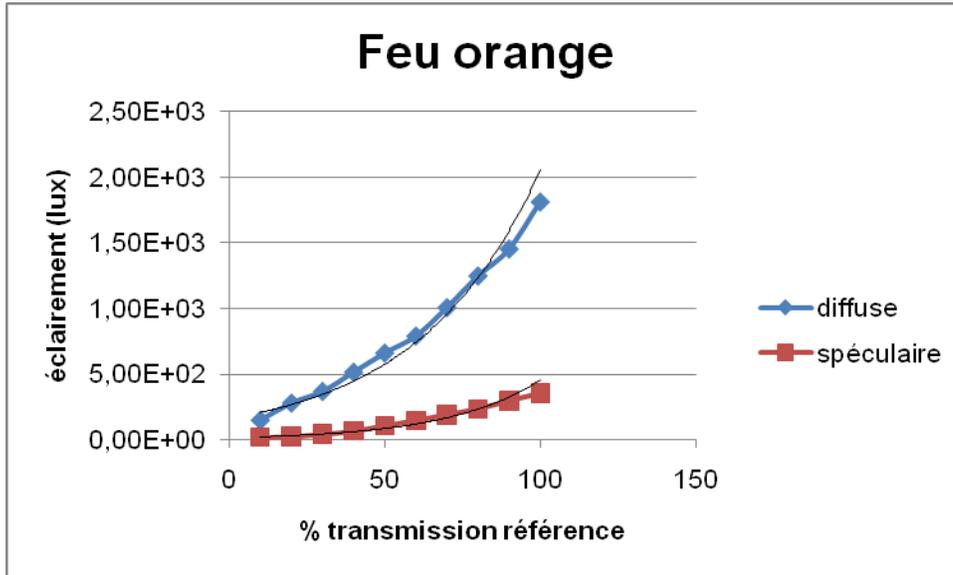


Figure 19 Comparaison entre la transmission diffuse et la transmission spéculaire du feu orange

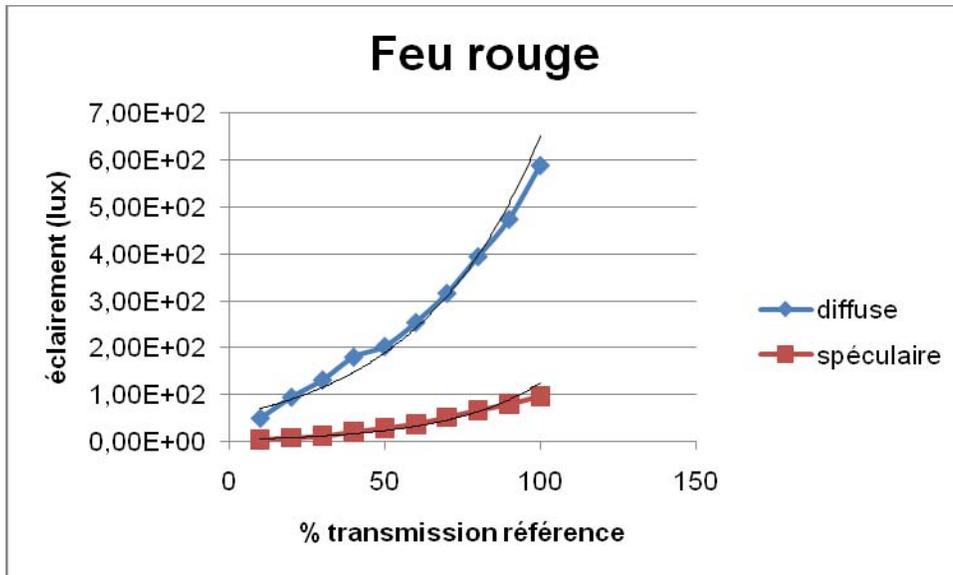


Figure 20 Comparaison entre la transmission diffuse et la transmission spéculaire du feu rouge

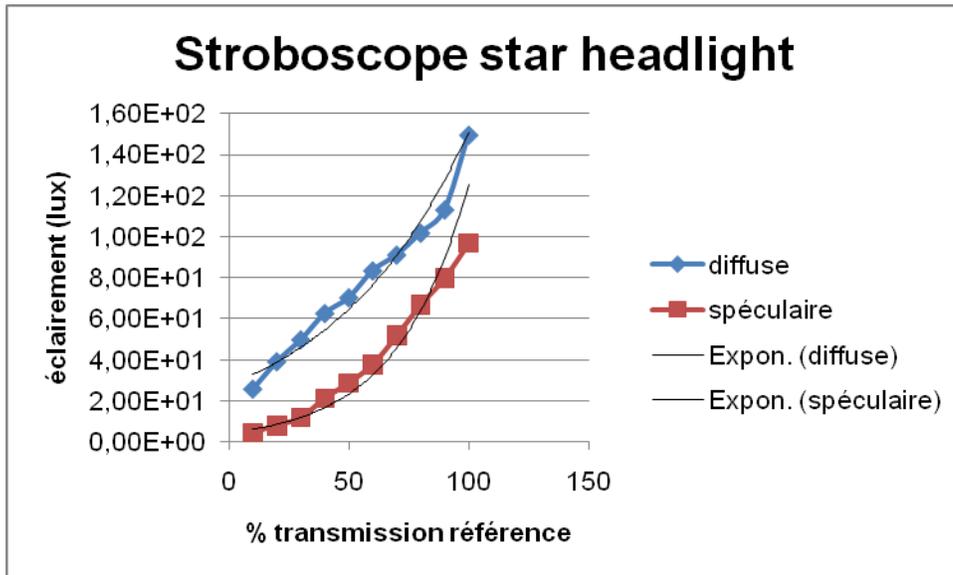


Figure 21 Comparaison entre la transmission diffuse et la transmission spéculaire du stroboscope Star Headlight

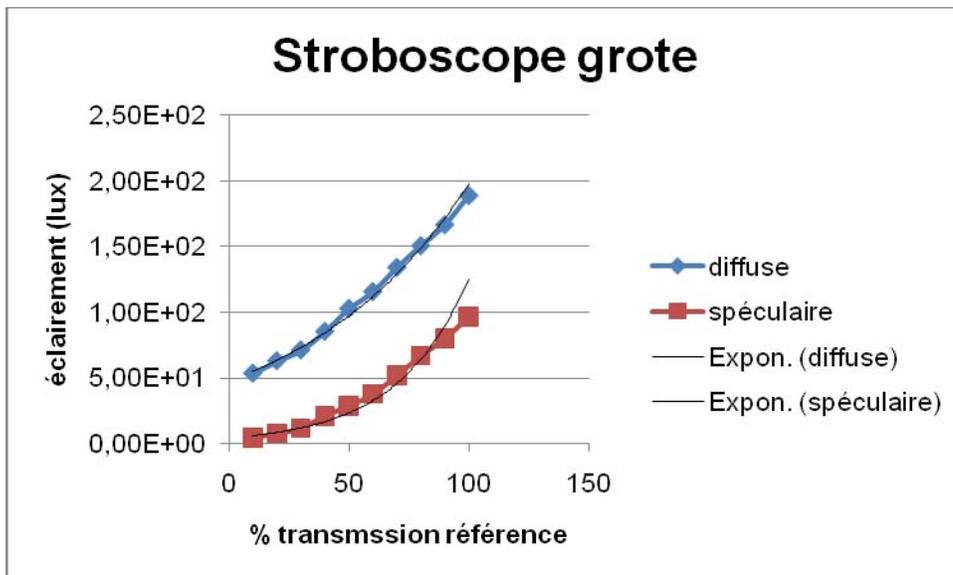


Figure 22 Comparaison entre la transmission diffuse et la transmission spéculaire du stroboscope Grote

5 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

5.1 Commentaires sur la visibilité dans le brouillard

Avant d'entreprendre l'analyse, il faut noter ici quelques éléments ou constats que nous avons faits à partir des données brutes. Nous constatons que la densité du brouillard influence la visibilité d'une cible. Cela se manifeste par une réduction de l'éclairement en fonction de la densité du brouillard. Cependant, la visibilité d'une cible n'est pas uniquement basée sur l'éclairement absolu, mais plutôt sur la différence entre la cible et le rayonnement de fond (arrière-plan), c'est-à-dire son contraste. Pour voir une cible, il faut qu'elle soit éclairée par un rayonnement de fond, sinon nous ne voyons que les lumières de celle-ci comme le montrent les simulations aux figures 23 et 24^[1].



Figure 23 Visibilité dans le brouillard de jour (visibilité 100 m)



Figure 24 Visibilité dans le brouillard de nuit (visibilité 100 m)

L'ajout d'un stroboscope sur un autobus scolaire permettra d'augmenter la distance à laquelle la cible sera visible de jour comme de nuit tout comme l'ajout de toute autre source additionnelle d'éclairage. Cependant, lors d'un épisode très sombre (faible rayonnement de fond), uniquement les feux du véhicule seront visibles (figure 24). Les résultats sur la lumière diffusée peuvent par contre montrer que le stroboscope permet d'améliorer le rayonnement de fond. Bien que notre étude ne porte pas sur cette observation, nous pouvons constater que la variation de la lumière diffusée d'un stroboscope est moins affectée par le brouillard que la lumière des feux standards. Pour expliquer ce résultat, nous pouvons émettre l'hypothèse que le stroboscope envoie de la lumière dans plusieurs directions, ce qui augmente ainsi la quantité de lumière diffusée vers le détecteur. Comme cette lumière diffusera à différents angles, elle produira également un rayonnement de fond. L'augmentation de ce rayonnement permet d'accroître la visibilité des objets pour être en mesure de les reconnaître. Il y a donc intérêt dans le brouillard à éclairer celui-ci dans plusieurs directions pour augmenter le rayonnement de fond et ainsi se rapprocher de la situation de brouillard de jour. Nous n'avons cependant pas étudié l'impact de ce phénomène sur la visibilité d'un objet ou sur sa reconnaissance.

Conséquemment, nous ne faisons pas de distinction entre la visibilité d'une cible et la visibilité de ses phares. En effet, nous avons défini la visibilité en accord avec la littérature comme étant la distance où le contraste est réduit à 5 %. Cela est valable pour une cible ou pour une source de lumière.

5.2 Position de la lampe sur le véhicule

En ce qui concerne la position du stroboscope sur l'autobus, nous n'avons pas trouvé d'évidence permettant de la remettre en cause. Ainsi, la norme canadienne CSA D250-07 peut être respectée intégralement. Un stroboscope centré sur le toit dans le dernier tiers de l'autobus est valable. En fait, nous notons deux positions possibles pour les feux de brouillard, soit au-dessus du véhicule ou très près du sol. Dans les deux cas, nous voulons créer une distance entre la ligne de vision du conducteur et la ligne d'éclairage de la lampe. Ainsi, la rétrodiffusion vers le conducteur est minimisée, ce qui permet une meilleure visibilité.

5.3 Modèle mathématique, ajout d'un stroboscope ou d'un feu

Comme décrit dans le rapport 1^[2] et dans la littérature, la distance de visibilité est définie comme la distance d où le contraste C/C_0 est de 5 %.

Le contraste de l'objet vu ou d'une source à une distance d est donnée par

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

Où K est le coefficient d'atténuation. Cette équation est valable à travers le brouillard et à travers tout environnement qui réduit la visibilité. Nous pouvons donc écrire l'approximation suivante pour la distance de visibilité ($C/C_0 = 0,05$) :

$$d \approx \frac{3}{K}$$

Cette distance est souvent notée par V_m .

² THIBAUT, Simon « Rapport d'étape : Efficacité des stroboscopes pour assurer la visibilité des autobus scolaires en cas de brouillard intense, dans la région de Saint-Tite-des-Caps (R644.1) », Université Laval, mai 2009

Pour notre autobus scolaire, l'ensemble des lampes produit un éclairage I_0 , à une distance d_1 , nous avons donc

$$I_1 = I_0 e^{-Kd_1}$$

En ajoutant un stroboscope d'éclairage ΔI , nous aurons alors l'équation suivante :

$$I_2 = (I_0 + \Delta I) e^{-Kd_2} = I_0 (1 + \eta) e^{-Kd_2}$$

Si nous définissons le gain en visibilité comme la distance à laquelle l'éclairage sera de retour au niveau I_1 avec $d_1 = Vm$ ($K = 3/Vm$). Nous pouvons alors écrire une équation mathématique pour le gain de visibilité en fonction de l'intensité de la lampe ajoutée :

$$Gain = \frac{d_2}{V_m} = \frac{1}{3} \ln \left[\frac{I_0 + \Delta I}{I_1} \right] = \frac{1}{3} \ln \left[\frac{1 + \eta}{0.05} \right]$$

La figure 25 nous montre le gain en distance de visibilité en fonction de l'intensité de la lampe ajoutée (en fraction de l'intensité I_0).

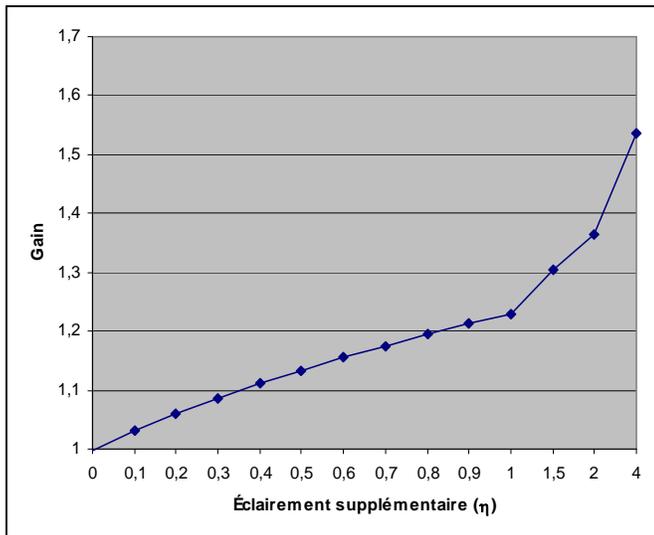


Figure 25 Gain de visibilité par l'ajout d'une lampe

L'ajout d'une lampe ou d'un stroboscope augmentera ainsi la distance à laquelle une certaine intensité lumineuse est détectée. Nous avons associé cette valeur à un gain de visibilité. Il faut noter que cette définition est uniquement utilisée à titre indicatif et qu'elle ne correspond pas à la définition de la distance de visibilité qui stipule 5 % de contraste (donc indépendant de l'intensité de la source). Ainsi, selon cette définition, l'ajout de feux sur un autobus scolaire n'augmentera pas la distance de visibilité. Cette analyse est valable pour la lumière spéculaire, mais en ajoutant la lumière diffuse par contre nous pouvons remarquer des comportements intéressants.

5.4 La lumière diffuse par opposition à la lumière spéculaire

Les résultats obtenus en laboratoire nous révèlent que les éclairagements diffus et spéculaires ont des comportements différents. Les figures 26 et 27 montrent les résultats normalisés pour l'éclairage diffus et spéculaire (l'éclairage obtenu est divisé par l'éclairage maximal de la lampe aux fins de comparaison). Ainsi, nous pouvons noter que l'éclairage spéculaire a un comportement similaire (tendance) pour tous les types de lampes. Nous observons que les stroboscopes sont légèrement supérieurs aux feux orange et rouges (figure 27). La différence est peut être due à la couleur, mais ce n'est pas significatif. Théoriquement, la composante bleue devrait être atténuée davantage, ainsi les feux rouges et orange auraient dû avoir un éclairage

supérieur. Il nous semble donc plus probable que la nature du stroboscope (fréquence) aurait pu conduire à cette légère différence. Les résultats pour la lumière diffuse présentent par contre une différence plus grande entre les stroboscopes et les feux clignotants, cette différence étant plus significative pour des densités de brouillard plus importantes.

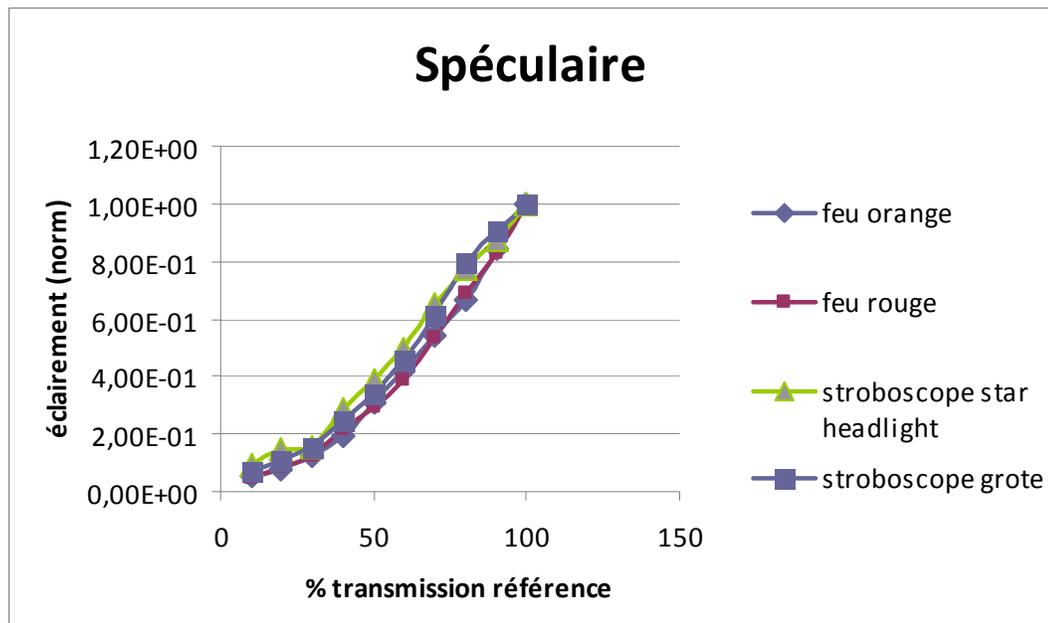


Figure 26 Comparaison des quatre sources lumineuses en transmission spéculaire

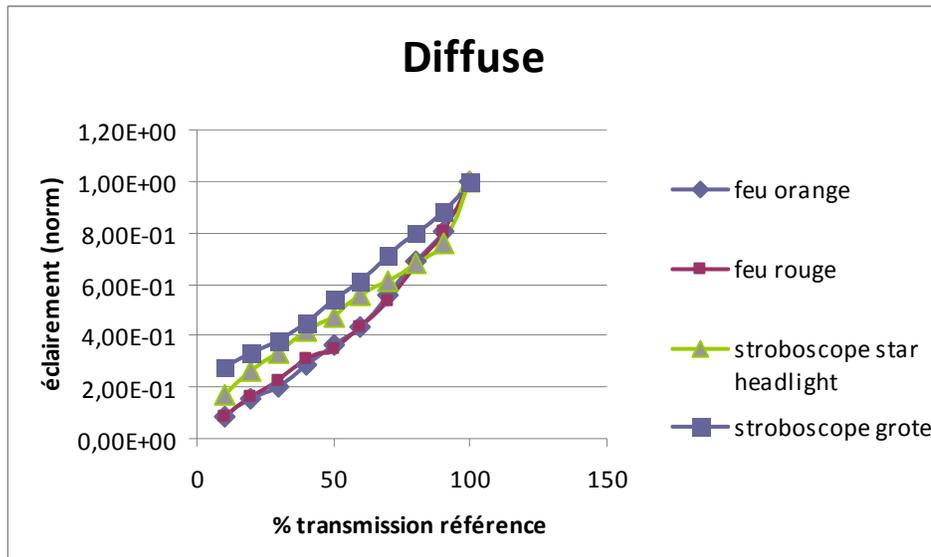


Figure 27 Comparaison des quatre sources lumineuses en transmission diffuse

Il semble donc que les stroboscopes seront visibles pour une densité de brouillard supérieure ou pour une distance plus grande.

Ainsi, en prenant une distance de visibilité de type A^[3] (distance de visibilité d'anticipation d'arrêt en milieu rural, zone de 100 km/h) de 210 mètres^[4], nous pouvons calculer le coefficient d'atténuation (k) équivalent de la brume à $0,0143 \text{ m}^{-1}$. En utilisant cette valeur, nous sommes en mesure de générer à partir de la courbe normalisée un graphique pour chacun des stroboscopes sous ce facteur d'atténuation. Les figures 28 et 29 présentent les résultats. Nous avons dans un graphique l'éclairage normalisé en fonction de la distance pour un brouillard présentant les caractéristiques de visibilité de type A. Pour la courbe spéculaire, l'éclairage à 210 mètres (type A) est de 0,05 (ou 5 %) et il augmente pour des distances plus faibles. Pour la lumière diffuse, nous remarquons que la courbe est similaire au comportement spéculaire à faible distance, mais présente une nette différence à longue distance. Nous avons ainsi extrapolé en utilisant une fonction exponentielle que dans ce type de brouillard, le stroboscope Grote aura une visibilité d'environ 400 mètres et celui de Star Headlight de 300 mètres. Ainsi,

³ La définition utilisée est antérieure au 30 octobre 2009.

⁴ Valeur provenant de la norme de transports Québec « distance de visibilité » tome I, chapitre 7, 2003-04-15. Norme québécoise en vigueur au moment de l'étude.

l'augmentation de la distance de visibilité due à la diffusion de la lumière dans le brouillard est significative. Ce gain est uniquement valable pour la comparaison entre une lampe spéculaire et un stroboscope de même intensité.

Notre calcul est également approximatif car nous faisons l'hypothèse que la diffusion a un comportement purement exponentiel. Les courbes en diffusion nous montrent que le comportement est plus complexe que cela. À la figure 24, les auteurs avaient basé leurs modèles uniquement sur une fonction d'atténuation exponentielle en notant qu'un modèle prenant en compte la diffusion devrait être fait à l'avenir. Des résultats expérimentaux, nous avons obtenu une augmentation variant de 50 % à 100 %, ce qui est très important. Nous ne sommes pas en mesure d'établir la raison de la différence dans le gain entre les deux stroboscopes. Il est donc nécessaire ici d'être prudent, nos expériences ayant été faites avec un modèle réduit en laboratoire. Cependant, nous pouvons affirmer que nos résultats montrent un gain en distance de visibilité en raison du comportement de la lumière diffuse. La loi de Beer-Lambert, caractérisée par une décroissance exponentielle, ne semble pas être valide pour des densités de brouillard importantes (ou à grande distance). En effet, la lumière diffusée par le brouillard dirigé vers l'observateur s'ajoute à la lumière spéculaire, ce qui augmente la quantité de lumière pour l'observateur.

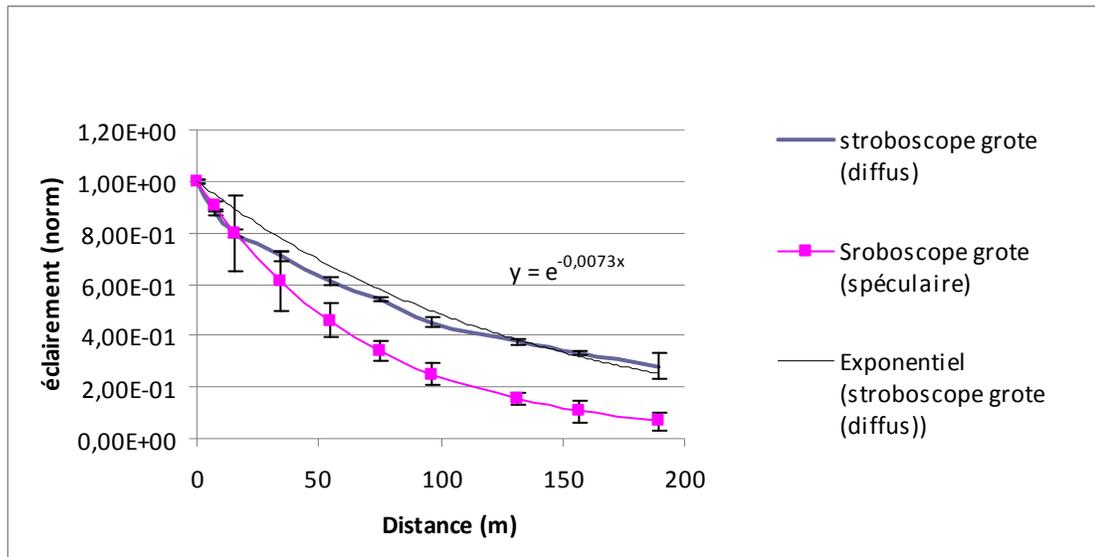


Figure 28 Stroboscope Grotte dans le brouillard ayant une distance de visibilité de type A (210 m)

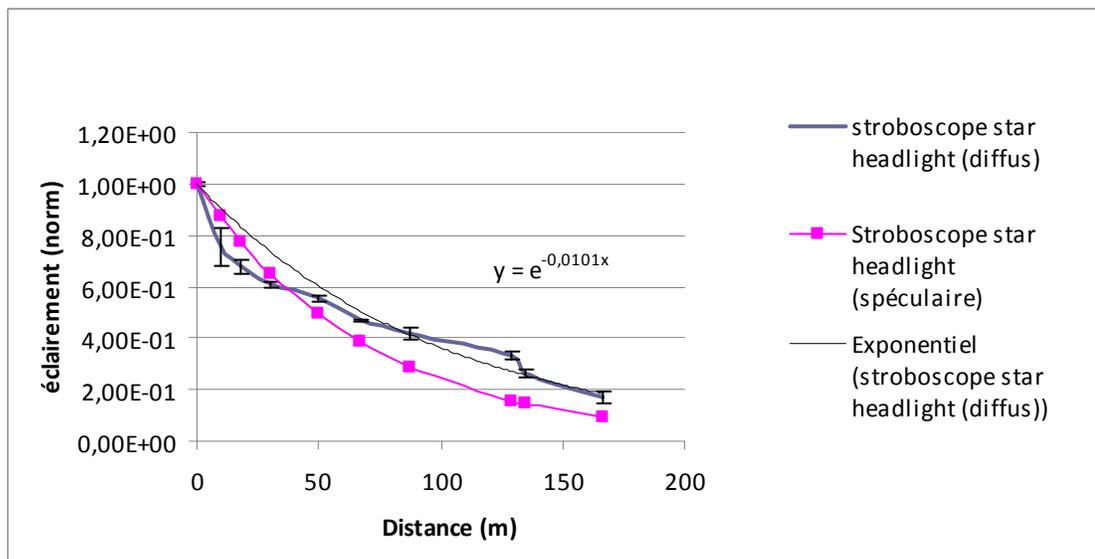


Figure 29 Stroboscope Star Headlight dans le brouillard ayant une distance de visibilité de type A (210 m)

6 MISE EN ŒUVRE

Ce rapport se veut un outil qualitatif et quantitatif pour appuyer une recommandation sur l'ajout de feux clignotants (stroboscope) sur un autobus scolaire dans le but d'augmenter la visibilité du véhicule en période de brouillard.

7 CONCLUSION ET RECOMMANDATION

En conclusion, le travail réalisé nous a permis de répondre à la majorité des objectifs du projet tout en faisant ressortir plusieurs phénomènes intéressants. Voici les principaux éléments de la conclusion :

- Nous avons mis en évidence qu'une cible en condition de brouillard pourrait n'être visible que par ses feux lumineux, particulièrement lorsque le rayonnement de fond est faible. Ainsi, l'ajout de lumière sur l'autobus augmentera la distance de visibilité dans le brouillard.
- Les résultats expérimentaux montrent que pour une intensité égale, la lumière diffuse pénètre plus loin dans le brouillard que la lumière spéculaire. Ainsi, l'ajout d'un stroboscope produisant plus de lumière diffuse qu'un feu clignotant augmentera la distance de visibilité dans le brouillard.
- Les résultats expérimentaux montrent que la couleur de la lumière n'est pas un facteur déterminant pour la visibilité dans le brouillard. Ainsi, l'ajout d'un stroboscope blanc conforme à la norme canadienne (CSA D250-07) est approprié.
- Les résultats expérimentaux ne permettent pas de conclure et d'établir une fréquence du stroboscope permettant d'augmenter la visibilité dans le brouillard. Ainsi, l'ajout d'un stroboscope conforme à la norme canadienne (CSA D250-07) est approprié.
- Les résultats expérimentaux ne permettent pas de conclure et d'établir une position du stroboscope sur l'autobus permettant d'augmenter la visibilité dans le brouillard. Ainsi, l'ajout d'un stroboscope conforme à la norme canadienne (CSA D250-07) est approprié.
- Les résultats expérimentaux nous ont permis de simuler le comportement en condition de visibilité équivalant à une distance de visibilité égale à la distance de freinage de type A et de montrer l'augmentation de la distance de visibilité en utilisant un stroboscope. Ainsi, l'ajout d'un stroboscope sur l'autobus augmentera la distance de visibilité dans le brouillard.

- L'ensemble de nos travaux ne permet pas d'établir l'intensité minimale requise par le stroboscope pour qu'il soit visible, car les résultats montrent qu'il y aura toujours une augmentation de la distance de visibilité avec l'ajout d'un stroboscope (en fonction). Ainsi, l'ajout d'un stroboscope conforme à la norme canadienne (CSA D250-07) augmentera la distance de visibilité dans le brouillard.

Les points mentionnés ci-dessus nous permettent de remplir notre mandat et nous amènent à conclure que l'ajout d'un stroboscope conforme à la norme canadienne (CSA D250-07) permet d'augmenter la distance de visibilité dans les épisodes de brouillard. Nous avons donc été en mesure de simuler et de reproduire différentes conditions atmosphériques causant une perte de visibilité. Nous avons validé nos expériences en transmission spéculaire comme ayant un comportement conforme à la décroissance exponentielle. Nous avons aussi relevé des pistes d'études supplémentaires. Ainsi, il serait intéressant de pousser les recherches sur les points suivants :

- Établir et modéliser les mécanismes de diffusion de la lumière dans le brouillard. Avec ce modèle, nous pourrions avoir des équations pour prédire selon l'épisode de brouillard le gain en distance de visibilité en fonction de l'intensité de l'éclairement diffusant.
- Étudier l'impact du rayonnement de fond en période de brouillard.
- Étudier l'impact de la couleur en utilisant des sources à spectre plus étroit.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1862, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2004, p. 77–81.

- [2] Norme CSA D250-07, *Autobus scolaires*, Association canadienne de normalisation, 8^e édition (2007).