



---

## Rapport pour l'étude n°11 429 AFA

---

Réf : 11 429 AFA/RE 01

# Rapport Opto Services pour l'Association Française d'Astronomie

*Etude de l'éblouissement de l'œil en milieu urbain et sur un site  
astronomique*

---

**Opto Services – Junior-Entreprise – Membre de la CNJE et de Juniors ParisTech**

Institut d'Optique *Graduate School*  
Campus Polytechnique, RD 128  
91127 Palaiseau Cedex – France

Tél. : +33 (0)1 64 53 32 49  
Courriel : [opto.services@institutoptique.fr](mailto:opto.services@institutoptique.fr)

---

SIRET 348 758 269 000 32 - APE 9499Z - TVA Intracommunautaire : FR33348758269

**Tous droits de reproduction et d'utilisation réservés.**  
Document rédigé par Paul Delrot

## **Auteurs de ce document**

Intervenant – Etudiant de l’Institut d’Optique Graduate School

Paul Delrot

Chef de projet – Etudiant de l’Institut d’Optique Graduate School

Guillaume Chion

Soutien et expertise scientifique – Professeur à l’Institut d’Optique Graduate School

M. Jean-Louis Meyzonnette

Relecture

M. Thierry Midavaine, membre du conseil d’administration de l’Association Française d’Astronomie

M. Jean-Louis Meyzonnette, Professeur à l’Institut d’Optique Graduate School

M. Nicolas Bessolaz- Laboratoire AIM Paris-Saclay, membre de l’association Light Control Brightness Environment Survey (LICORNESS)

M. Lionel Jacobowicz, Professeur à l’Institut d’Optique Graduate School

M. Justin Plantier, Ingénieur de recherche à l’Institut de Recherche Biomédicale des Armées

## ***Avant-propos***

Le présent rapport constitue la livraison de Opto Service à l’AFA pour sa commande passée le 05/10/11, objet du devis et de la proposition Opto Service faite dans l’Avant-Projet référencé n° 11 429 AFA/AP 02.

Ce document est la version V2 du rapport final soumis à l’approbation de l’AFA. La version finale du document après approbation est propriété de l’AFA,

Opto Services, en accord avec le client, archivera les données concernant l’étude sur support informatique et papier. Cependant, aucune utilisation ou reproduction des travaux ou études ne pourra se faire sans l’autorisation écrite du client.

## Introduction

Cette étude s'inscrit dans un projet plus vaste actuellement en plein développement de l'Association Française d'Astronomie.

Ce projet consiste à contribuer à l'établissement de la spécification technique pour un éclairage urbain en étudiant les exigences relatives aux effets d'éblouissement de l'œil. Ces spécifications techniques ont pour but de permettre aux communes limitrophes des sites astronomiques ou soucieuses de la pollution lumineuse d'élaborer un cahier des charges lors d'un appel d'offres pour la rénovation de l'éclairage urbain.

Ce rapport vise à établir les exigences manquantes dans la spécification concernant l'éblouissement, plus précisément la luminance maximale l'intensité ou le flux des sources présentes dans le champ visuel afin qu'elles n'éblouissent pas un observateur d'une étoile de magnitude 6 à 20°. Cette étude s'appuie sur deux critères fondamentaux : l'éclairement à la fin du crépuscule civil ainsi que le confort de l'œil en milieu urbain.

L'éclairement rencontré à la fin du crépuscule civil (le Soleil à  $-6^\circ$  de l'horizon) est variable suivant les conditions météo. Il est de l'ordre de quelques lux, et avec une certaine marge il est toujours inférieur à 5 lux (Réf.[10]). A ce niveau d'éclairement, l'œil est toujours en régime photopique, c'est ce qui a justifié cette première valeur de l'exigence n°1 de la spécification AFA (Réf.[4]). A savoir, le niveau d'éclairement au sol sur la partie de la chaussée empruntée par les piétons est inférieur à 5 lux .

Une valeur plus faible est peut être justifiable du fait des effets de l'éblouissement en milieu urbain.

En effet, il est commun de nos jours d'observer des éclairages urbains très puissants et une des questions posées par l'AFA est : cette surenchère d'éclairage n'entraînerait-elle pas un cercle vicieux ? A savoir, ne chercherait-on pas à pallier la gêne occasionné par un éclairage plus puissant qui ne ferait qu'augmentait cette gêne?

Ainsi cette étude sera menée dans l'optique que, dans une zone urbaine, il s'agit d'améliorer ou neutraliser les effets de l'éblouissement afin d'améliorer le confort des usagers, et sur un site astronomique de garantir un mode de fonctionnement de l'œil en niveau scotopique adapté à l'observation astronomique.

L'étude de l'éblouissement est une question scientifique ancienne, déjà en 1931, Charles Fabry l'introduisait ainsi :

« Le sujet dont nous allons nous occuper ce soir, l'éblouissement, est une des questions les plus complexes de l'optique physiologique ; son étude est même quelque peu rebutante, car il n'il y a guère d'espoir d'arriver à des lois simples. Cependant, l'importance pratique de cette question est si grande, elle se rencontre dans des problèmes d'une telle actualité, qu'il nous a paru nécessaire de la mettre à notre programme. Nous n'avons certes pas l'espoir d'épuiser la question ; mais peut-être, des exposés et des discussions qui vont avoir lieu, pourrons-nous tirer quelques renseignements utiles.

Il n'est même pas facile de donner une définition entièrement satisfaisante de l'éblouissement. Pour le moment, je me contenterais de la suivante : l'éblouissement est une diminution des facultés visuelles par suite de la présence d'un objet très lumineux se projetant dans le voisinage des objets que l'on cherche à distinguer. ».

## Table des matières

Avant-propos.....	2
Introduction.....	3
I-Glossaire .....	5
II-Rappel sur l'anatomie de l'œil et l'éblouissement .....	5
1- Anatomie de l'œil humain .....	5
2- L'éblouissement.....	8
L'éblouissement perturbateur .....	8
L'éblouissement gênant .....	13
III-Eblouissement de l'œil en milieu urbain.....	14
1-Mise en Situation .....	14
2-Influence de l'éblouissement perturbateur .....	15
2.1-Introduction .....	15
2.2- Discussion sur le TI à adopter pour l'étude .....	15
2.3-Comparaison des différents modèles .....	17
2.4- Application des critères précédemment définis au calcul de l'éclairement maximal dans le plan de l'œil.....	19
2.5-Hauteur optimale d'un luminaire .....	22
3-Spécifications sur l'éblouissement perturbateur .....	28
IV-Eblouissement de l'œil en situation depuis un site astronomique.....	29
1-Mise en Situation .....	29
2-Eblouissement perturbateur.....	30
3-Spécifications sur l'éblouissement perturbateur sur un site astronomique .....	33
Cas d'une seule source éblouissante visible à l'horizon.....	33
VII- Annexes .....	34
1- Mise à jour de la spécification AFA.....	34
2-Procédure de Validation.....	34
Graphiques additionnels .....	35
VIII- Conclusion.....	35
IX- Références Bibliographiques.....	36
Notations et Acronymes .....	37

## I-Glossaire

**Eclairement** : densité de flux lumineux reçu par unité de surface. L'unité est le lux. Une étoile de magnitude 0 produit un éclairement de  $2,65 \cdot 10^{-6}$  lux.

**Flux lumineux**: grandeur visuelle qui correspond à la puissance lumineuse émise par une source, soit un nombre de photons par unité de temps. Il produit (en étant pondéré par la courbe de sensibilité spectrale  $V(\lambda)$  p.7) une impression visuelle sur un observateur humain. L'unité est le lumen (lm).

**Intensité lumineuse** : densité de flux lumineux par unité d'angle solide. L'unité est la candela (cd).

**Luminance** : la luminance est l'intensité lumineuse par unité de surface apparente. L'unité est la candela par mètre carré ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

On retrouvera p.37 en fin de document, un glossaire des acronymes et notations utilisés dans cette étude.

## II-Rappel sur l'anatomie de l'œil et l'éblouissement

### 1- Anatomie de l'œil humain

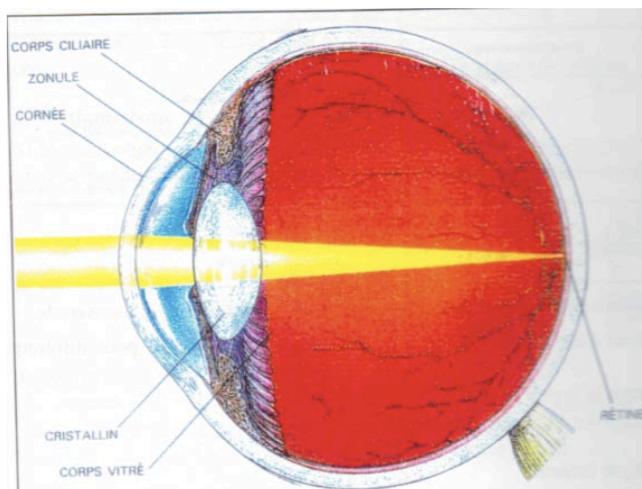


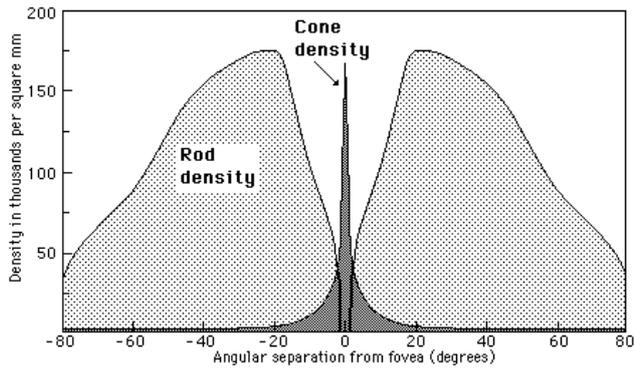
Fig.II.1.1-Anatomie de l'œil humain d'après Réf.[1]

L'œil est l'organe de la vision, il reçoit de la lumière des objets dont il projette l'image sur une partie appelée rétine, qui analyse et transmet cette image au nerf optique. Le cerveau interprète finalement cette image.

L'œil se décompose en plusieurs éléments, nous nous attarderons seulement sur les éléments essentiels à la compréhension de l'éblouissement. Pour une analyse complète nous proposons en référence le document [8]. L'œil humain a une puissance de 59 dioptries.

La cornée constitue le premier dioptrique que traverse la lumière, elle est totalement transparente. La forme bombée de la cornée apporte les deux tiers de la puissance optique de l'œil. A savoir, sa puissance optique est de 42 dioptries.

Le cristallin confère à l'œil sa capacité d'accommodation, en changeant de forme il permet à un œil emmétrope de passer d'une puissance de 42 à 59 dioptries. L'iris, présent entre la cornée et le cristallin, est un diaphragme quasi circulaire jouant le rôle de pupille de l'œil. Cette pupille varie entre 1,5 mm et 8 mm de diamètre et limite la quantité de lumière entrant dans l'œil.



**Fig.II.1.2 - Densité surfacique des cônes et bâtonnets sur la rétine, d'après Réf.[3]**

Le centre de la rétine contient uniquement des cônes (voir Fig.II.1.2).

Ainsi, on distingue trois domaines d'adaptation lumineuse pour l'œil (Réf.[17]) : le domaine photopique correspond à la vision de jour où seuls les cônes sont actifs, la luminance ambiante est alors supérieure à  $3 \text{ cd.m}^{-2}$ .

Le domaine scotopique correspond à la vision de nuit où seuls les bâtonnets fonctionnent, la luminance ambiante est alors inférieure à  $10^{-3} \text{ cd.m}^{-2}$ .

Enfin le domaine mésopique, pour lequel les deux types de récepteurs fonctionnent, cela correspond donc à une luminance ambiante comprise entre  $0.001 \text{ cd.m}^{-2}$  et  $3 \text{ cd.m}^{-2}$ .

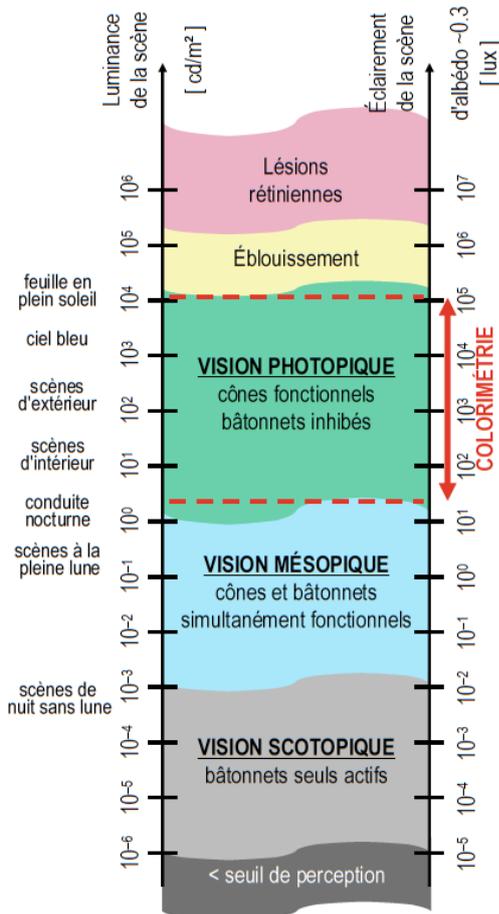
Entre ces deux niveaux de luminance l'œil est en vision mésopique, il exploite à la fois la sensibilité des cônes et celles des bâtonnets.

Les niveaux d'éclairement moyens minimaux au sol actuellement préconisés par l'Association Française d'Eclairage pour un trottoir sont de 7.5 à 10 lux pour un niveau ambiant qualifiés de faible à moyen dans le document référencé [14]. Un niveau d'éclairement moyen à maintenir qualifié d'élevé dans une zone à risque d'agression est de 20 lux, contre 15 lux dans une zone à risque normal (Réf.[14]).

Comme on l'a rappelé en introduction, à la fin du crépuscule civil i.e au moment où les lampadaires sont allumés, l'éclairement est toujours inférieur à 5 lux. Les niveaux d'éclairement préconisés par l'AFE semblent donc excessifs et ne favorisent pas la vision mésopique comme on peut le voir sur la figure II.1.3.

Dans le cas de l'éblouissement sur un site astronomique on se trouve clairement dans le domaine scotopique i.e. seuls les bâtonnets sont actifs.

Sur la figure ci-contre le domaine photométrique d'éblouissement correspond à la vision diurne et ne s'applique donc pas à notre



**Fig.II.1.3 - Domaines photométriques, d'après Réf.[3]**

étude.

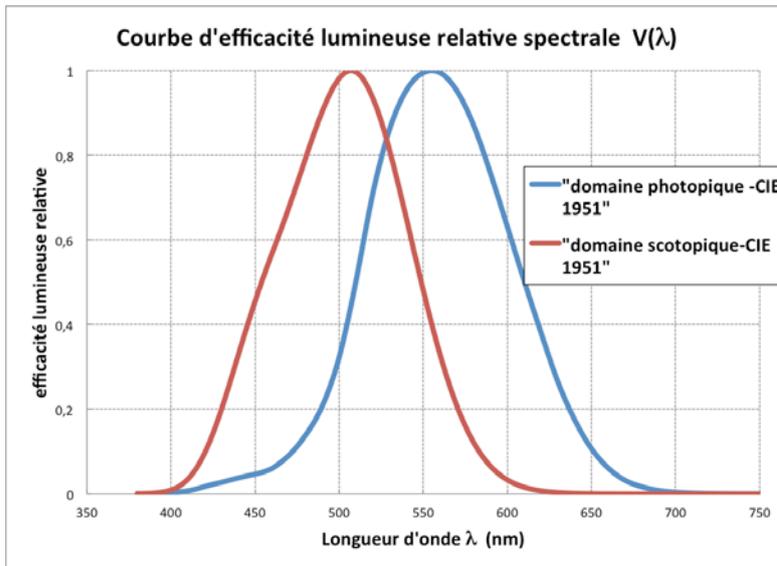


Fig.II.1.4 - D'après Réf.[3]

consultent un document.

Les cônes et les bâtonnets ne sont pas sensibles aux mêmes longueurs d'ondes, ceci est dû aux différents types de pigments photosensibles qu'ils contiennent.

Ainsi on remarquera que les bâtonnets sont aveugles dans le rouge. Cette caractéristique est exploitée depuis bien longtemps par les astronomes amateurs qui utilisent une lumière rouge afin de ne pas être éblouis lorsqu'ils

## 2- L'éblouissement

### a) Introduction

L'éblouissement est une perte de la performance visuelle ou de la visibilité, ou encore la gêne et le malaise éprouvés en raison d'une luminance dans le champ visuel supérieure au niveau de luminance auquel les yeux sont adaptés.

Les mécanismes de l'éblouissement peuvent être séparément ou conjointement la diffusion de lumière qui se produit dans l'œil, la saturation des photorécepteurs et les mécanismes nerveux (rétiniens ou d'origine cérébrale).

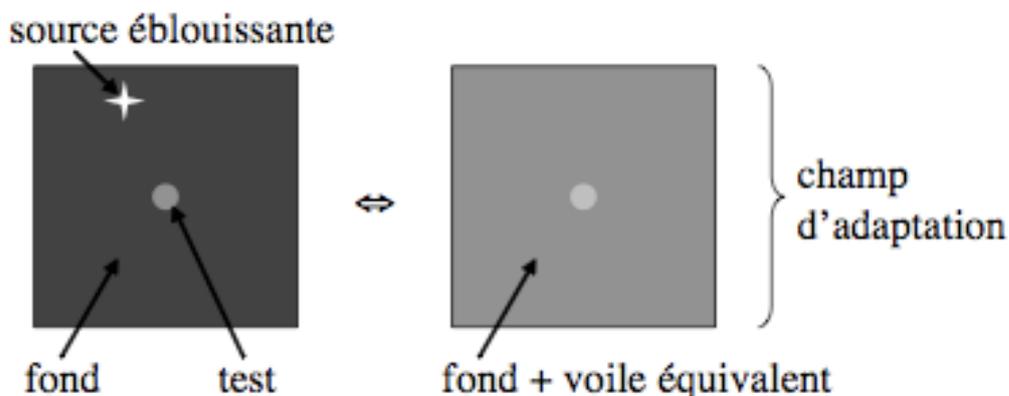
On distingue l'éblouissement perturbateur (disability glare) de l'éblouissement gênant (discomfort glare).

### L'éblouissement perturbateur

#### A-Effet de l'éblouissement perturbateur

L'éblouissement perturbateur est un éblouissement non douloureux mais qui altère les capacités visuelles. On l'appelle encore en médecine, éblouissement simultané.

L'effet de l'éblouissement perturbateur (Fig.II.2.1) est équivalent à celui d'un voile lumineux uniforme (luminance de voile équivalente) se superposant à la distribution de luminance de la scène observée. L'importance de ce phénomène dépend de plusieurs paramètres, parmi lesquels l'intensité de la source éblouissante, son excentricité par rapport à la direction du regard, ainsi que l'âge de l'observateur.



**Fig.II.2.1- Effet de la présence d'une source lumineuse dans le champ visuel (CIE, 2002)**

Physiologiquement la luminance de voile s'explique par la diffusion intraoculaire de la lumière provenant de la source éblouissante.

La superposition de la luminance de voile  $L_{voile}$  à la luminance de fond  $L_{fond}$  fait décliner le *contraste de Weber*  $C$  de la scène observée. Le contraste de Weber se définit comme suit lorsqu'un observateur cherche à discerner un objet de luminance  $L_{objet}$  sur un fond de luminance  $L_{fond}$ , tel que la Fig.II.2.1 l'illustre :

$$C_{sans\éblouissement} = \frac{L_{objet} - L_{fond}}{L_{fond}} \quad (1)$$

$$C_{\text{éblouissement}} = \frac{(L_{\text{objet}} + L_{\text{voile}}) - (L_{\text{fond}} + L_{\text{voile}})}{L_{\text{fond}} + L_{\text{voile}}} \quad (2)$$

$$C_{\text{éblouissement}} = \frac{L_{\text{objet}} - L_{\text{fond}}}{L_{\text{fond}} + L_{\text{voile}}} \quad (3)$$

Cette définition du contraste correspond bien à l'activité des astronomes, qui ont à distinguer des objets de luminance élevée, les étoiles, sur un fond de ciel de luminance constante.

De plus dans le cadre de la spécification de l'AFA (Réf.[4]), un piéton doit pouvoir facilement discerner sur la chaussée des obstacles, trous ou autres marques au sol ; cela repose sur sa capacité à distinguer sur la chaussée des objets de luminance différentes de la chaussée.

L'étude de cette capacité du piéton revient à étudier le contraste de Weber que son œil est en mesure d'apprécier, et ce contraste limite lorsqu'il est soumis à un éblouissement ou non.

### *B-Modélisation mathématique de l'éblouissement perturbateur*

Malgré les craintes de Charles Fabry à propos de la modélisation de l'éblouissement, il existe aujourd'hui de nombreux modèles mathématiques de l'éblouissement perturbateur.

Nous nous restreindrons aux modèles les plus largement acceptés par la communauté scientifique. Ces derniers permettent de calculer la luminance de voile équivalente à celle produite par une source éblouissante.

La plupart des modèles ont une expression mathématique basée sur le modèle de Stiles-Holladay (Réf.[5]):

$$L_{\text{voile}} = \frac{kE_{\text{ébloui}}}{\theta^n} \quad (4)$$

Avec :

- $L_{\text{voile}}$  : la luminance de voile équivalente qui se superpose à la distribution de luminance observée, s'exprime en  $\text{cd.m}^{-2}$ .
- $E_{\text{ébloui}}$  : l'éclairement dû à la source éblouissante mesuré dans le plan normal à la ligne de vision et à la hauteur des yeux de l'observateur, s'exprime en lux.
- $\theta$  : l'angle d'arc formé entre la droite passant par la source éblouissante et l'œil et la ligne de vision de l'observateur, en degré.
- $k$  : un coefficient multiplicateur dépendant de l'âge et dans les modèles les plus précis de la couleur des yeux de l'observateur.
- $n$  : un exposant qui peut varier avec l'angle de la source éblouissante.

Dans le cas où plusieurs sources éblouissantes viennent perturber la vision, il suffit de sommer leurs luminances de voile équivalentes respectives pour obtenir la luminance de voile totale.

### Validité des modèles

Tous les modèles qui suivent sont valables pour des domaines angulaires définis que nous précisons. Cependant il n'est jamais indiqué dans les publications que nous avons pu consulter de limites quand à l'éclairement éblouissant et la luminance de voile équivalente résultante.

Ces modèles ont été développés pour la fin du domaine photopique, la vision mésopique et le début de la vision scotopique, en conséquence nous considérerons par la suite qu'ils sont valables dans le cadre d'un œil en milieu urbain en présence d'un réverbère, ainsi qu'en situation sur un site astronomique.

En effet s'il est évident que l'application de ces modèles est valable pour un observateur en milieu urbain, la luminance de fond (et donc ambiante) sur un site astronomique, est autrement plus faible, de l'ordre de  $10^{-4}$  cd.m<sup>-2</sup> (voir tableau ci-dessous), et il serait judicieux de s'interroger sur la pertinence de tels modèles dans le domaine scotopique.

Néanmoins, la diffusion de lumière intraoculaire peut-être considéré comme linéaire aux bas niveaux lumineux. La luminance de voile équivalente étant proportionnelle à l'éclairement dans le plan de l'œil et donc au flux reçu et diffusé, on pourra raisonnablement considérer que le modèle de Stiles-Holladay est toujours valable pour des niveaux de luminances scotopiques.

En revanche le calcul du *threshold increment* (TI) (p.12) est défini dans un domaine bien particulier que l'on retrouvera ci-après.

#### Rappel sur les niveaux de luminance en condition scotopique :

Pour rappel, voici différents niveaux de luminance de source qui fournissent un ordre de grandeur des luminances de l'étude, d'après Réf.[10] :

Luminance de la source	Cd/m <sup>2</sup>	Mag/arcsec <sup>2</sup>
Surface de la pleine Lune	2500	
Crépuscule	3	
Zénith au crépuscule civil	$3 \cdot 10^{-1}$	
Ciel typique avec pleine Lune	$3 \cdot 10^{-2}$	
Limite haute de la vision scotopique	$3 \cdot 10^{-2}$	
Ciel avec une Lune de 10 jours	$5 \cdot 10^{-2}$	18.5
ciel de qualité moyenne au zénith (de nuit)	$6 \cdot 10^{-4}$	20.7
Ciel de bonne qualité au zénith (de nuit)	$4 \cdot 10^{-4}$	21.1
Ciel exceptionnellement sombre	$2 \cdot 10^{-4}$	22.0

Le précédent rapport Opto Services sur l'étude de la pollution lumineuse (Réf.[9]) a conclu que pour observer une étoile de magnitude 6 à 20° au-dessus de l'horizon la luminance de fond de ciel ne devait pas dépasser  $6.3 \cdot 10^{-4}$  cd.m<sup>-2</sup>.

Ce niveau de luminance de fond de ciel à ne dépasser avait été calculé à partir d'un modèle de diffusion atmosphérique. En revanche, dans cette étude nous n'aborderons pas l'effet de halo dû à la pollution lumineuse, qui a été traité en dans le document référencé [9], mais seulement le potentiel éblouissant d'une source lumineuse se trouvant dans le champ de vision d'un observateur.

1) Modèle d'Adrian et Bahjdi (1991) (Réf.[6])

Ce modèle utilise l'expression **(4)** avec :

$$\bullet \quad k = 9,05 \left(1 + \left(\frac{\text{Age}}{66,4}\right)^4\right) \quad (5)$$

Ainsi pour un observateur de 25 ans,  $k=9,23$  et pour observateur de 50 ans,  $k=11,95$ .

$$\bullet \quad n = 2,3 - 0,07 \log(\theta) \quad \text{pour } 0,2^\circ < \theta \leq 2^\circ \quad (6)$$

$$n = 2 \quad \text{pour } \theta > 2^\circ \quad (7)$$

2) Modèle de Stiles-Holladay (Réf.[5,7])

Ce modèle est utilisé par la Communauté Européenne et correspond à la norme européenne d'évaluation de l'éblouissement (Réf.[7]) qui entrera en vigueur en 2013. Ce modèle utilise l'expression **(4)** avec :

$$\bullet \quad k = 9,86 \left(1 + \left(\frac{\text{Age}}{66,4}\right)^4\right) \quad (8)$$

$$\bullet \quad n = 2 \quad (9)$$

Il est valable pour  $1,5^\circ < \theta < 60^\circ$ . On a alors  $k=10$  pour un observateur de 23 ans et  $k=13$  pour un observateur de 50 ans.

3) Modèle de l'observateur standard ébloui (CIE, 1999)

Ce modèle plus évolué que le précédent prend en compte la couleur des yeux. En effet, différentes recherches (Réf.[5]) ont mis en évidence qu'un observateur aux yeux clairs est plus ébloui qu'un observateur aux yeux foncés.

$$L_{\text{voile}} = E_{\text{ébloui}} \left( \frac{10}{\theta^3} + \left( \frac{5}{\theta^2} + \frac{0,1p}{\theta} \right) \left( 1 + \left( \frac{A}{62,5} \right)^4 \right) + 2,5 \cdot 10^{-3} p \right) \quad (10)$$

avec :

- $L_{\text{voile}}$  : la luminance de voile équivalente qui se superpose à la distribution de luminance observée, s'exprime en  $\text{cd.m}^{-2}$ .
- $E_{\text{ébloui}}$  : l'éclairement dû à la source éblouissante mesuré dans le plan normal à la ligne de vision et à la hauteur des yeux de l'observateur, s'exprime en lux.
- $\theta$  : l'angle d'arc formé entre la droite passant par la source éblouissante et l'œil et la ligne de vision de l'observateur, en degré. On a :  $0,1^\circ < \theta < 100^\circ$  comme domaine de validité du modèle.
- $p$  : une constante dépendant de la couleur des yeux,  $p=0,5$  pour des yeux marrons,  $p=1,2$  pour des yeux bleus.

#### 4) Augmentation relative du seuil de perception ou T.I. : threshold increment

Cet outil mathématique permet de quantifier l'augmentation relative du seuil de luminance perceptible d'un observateur en présence d'une source éblouissante.

La norme européenne (Réf.[7]) fixe le modèle mathématique de l'augmentation relative du seuil de perception comme suit :

$$\pi = \frac{65}{L_{moy}^{0,8}} L_{voile} \quad (11)$$

avec :

- TI : augmentation relative du seuil de perception en %,
- $L_{moy}$  : luminance moyenne de la chaussée, en  $cd.m^{-2}$ , on doit avoir :  $0.05 < L < 5 \text{ cd.m}^{-2}$  pour que le modèle reste valide,
- $L_{voile}$  : luminance de voile équivalente, en  $cd.m^{-2}$ .

### L'éblouissement gênant

Par définition, l'éblouissement gênant (ou éblouissement temporaire) n'altère pas les capacités visuelles mais est douloureux. Cet éblouissement est purement subjectif ce qui le rend difficile à modéliser. Il n'apparaît que pour des niveaux très importants d'énergie intégrée au niveau de la rétine.

Contrairement à l'éblouissement perturbateur, ses mécanismes ne sont pas encore bien compris, il semblerait (Réf.[1,8]) qu'ils tiennent surtout des mécanismes nerveux.

Des expériences menées aux Etats-Unis, (Réf.[1]) pour évaluer le temps de récupération après un flash nucléaire, d'un sujet adapté à une luminance variant entre  $0.3 \text{ cd.m}^{-2}$  et  $2 \text{ cd.m}^{-2}$  (ambiance mésopique) ont permis au Médecin Général Inspecteur Court de proposer une loi empirique sur les temps de récupération pour retrouver une acuité visuelle de 3/10.

Les niveaux de luminance mis en jeu lors de cette expérience correspondent aux niveaux de luminance du cahier des charges de l'AFA (voir p.14). La loi empirique déduite de cette expérience est valable pour des énergies intégrées entre  $2 \cdot 10^5 \text{ td.s}$  et  $10^8 \text{ td.s}$ , des diamètres apparents de la source éblouissante entre  $2^\circ$  et  $10^\circ$ , (pour les unités voir ci-dessous).

Les sujets étaient soumis à des durées d'exposition entre 200 ms et  $100 \mu\text{s}$ , ce qui correspond au minimum à un éclairement rétinien de  $10^4 \text{ td}$ , soit à l'éclairement rétinien dû à une luminance supérieure à  $2000 \text{ cd.m}^{-2}$ .

Dans les deux situations qui font l'objet de la présente étude, à savoir l'œil en milieu urbain en présence d'un réverbère, et l'œil en situation d'observation sur un site astronomique, il apparaît évident que l'œil n'est pas en présence de telles sources.

On étudiera donc par la suite seulement l'éblouissement perturbateur, et les spécifications qui découleront de cette étude couvriront de facto l'éblouissement gênant car celui-ci n'apparaît que pour des niveaux d'éclairement supérieurs à ceux causant un éblouissement perturbateur.

NOTA: le troland, symbole « td » se définit comme l'éclairement rétinien d'une surface de luminance de  $1 \text{ cd.m}^{-2}$  vue à travers une pupille de  $1 \text{ mm}^2$ .

### III-Eblouissement de l'œil en milieu urbain

L'objet de cette partie est de spécifier le type d'éclairage urbain compatible avec le déplacement d'un piéton sur la partie de la chaussée qui lui est réservée. L'éclairage doit permettre à un piéton de marcher facilement en appréciant le sol sans être ébloui par un luminaire.

#### 1-Mise en Situation

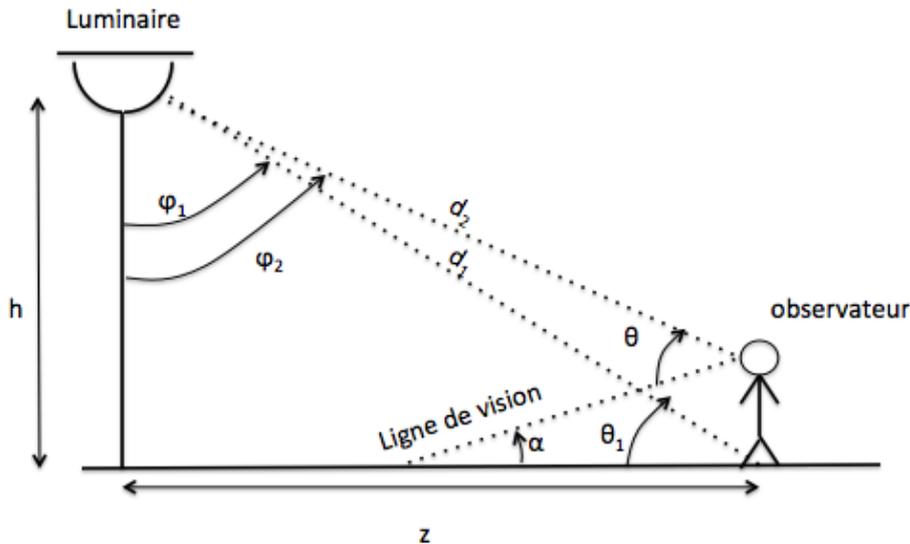


Fig.III.1.1-Piéton en situation d'éblouissement par un réverbère dans un milieu urbain

On considérera la situation suivante : un piéton se trouve sur la partie de la chaussée qui lui est dédié, il se trouve à une distance  $d$ , comprise entre 0 et 20m, de la projection sur le plan de la chaussée du réverbère. Sa ligne de vision fait un angle d'arc  $\alpha$  avec le plan (supposé horizontal) de la chaussée, cette même ligne de vision fait un angle d'arc  $\theta$  avec la droite passant par la source éblouissante (le lampadaire) et l'œil.

Comme spécifié par l'expression du besoin de l'AFA (Réf.[4]), l'éclairage au sol ne doit pas dépasser 5 lux, néanmoins pour étendre la modélisation aux éclairages urbains les plus couramment employés on prendra  $E_{chaussée}$  compris entre 1 lux (éclairage supérieur à une nuit de pleine lune : 0.5lux) et 20 lux (rue avec un niveau d'éclairage ambiant élevé (Réf.[14])). En considérant que la chaussée a un albédo de  $\rho=0.15$  (typique des surfaces bétonnées) et que c'est une surface lambertienne, on obtient par la loi de Lambert :

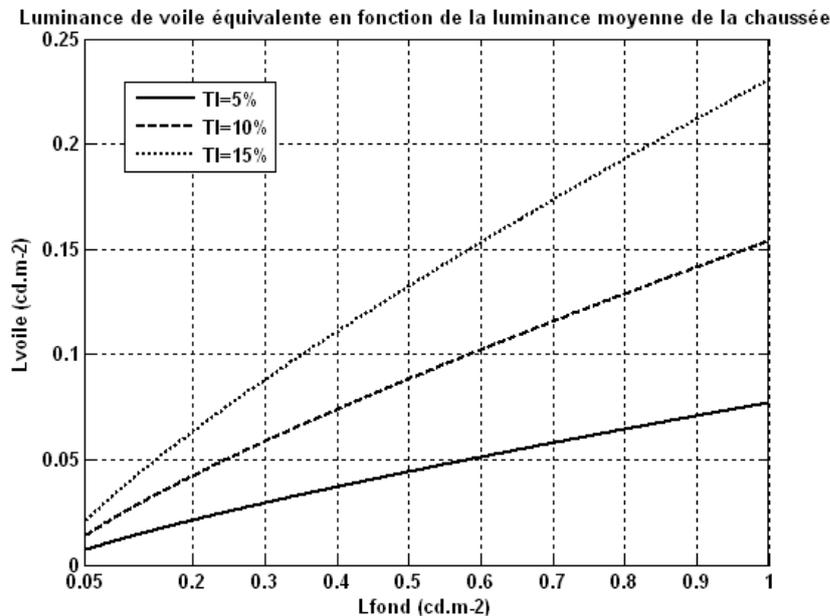
$$L = \frac{\rho E}{\pi} \tag{13}$$

on obtient une luminance moyenne de la chaussée  $L_{moy}$  comprise entre 0.05 et 1  $cd.m^{-2}$ .

## 2-Influence de l'éblouissement perturbateur

### 2.1-Introduction

Le domaine de luminance calculé ci-dessus entre dans les limites du calcul de l'augmentation relative du seuil de perception (TI) (voir p.12). Ce qui nous permet d'obtenir le graphique suivant :



**Fig.III.2.1.1- Luminance de voile équivalente en fonction de la luminance moyenne de la chaussée pour différentes valeurs de T.I.**

Ce graphique se lit comme suit : pour une valeur de TI (augmentation relative du seuil de perception) fixée, la luminance de voile équivalente qui est acceptable varie selon la luminance du fond. Dans notre problème, la luminance de fond est la luminance moyenne de la chaussée.

Ainsi, pour TI=5% et une luminance moyenne de la chaussée de 1 cd.m<sup>-2</sup>, on ne diminue pas la perception du contraste de plus de 5% pour une luminance de voile équivalente comprise entre 0 et 0.07 cd.m<sup>-2</sup>.

### 2.2- Discussion sur le TI à adopter pour l'étude

#### a) Norme européenne

La norme européenne prEN 13201-2 (Réf.[13]) entrée en vigueur en 2005 et actuellement en révision (publication en 2013) fixe une augmentation relative du seuil de perception (TI) maximale de 10% sur la chaussée et de 15% pour les zones faiblement éclairées.

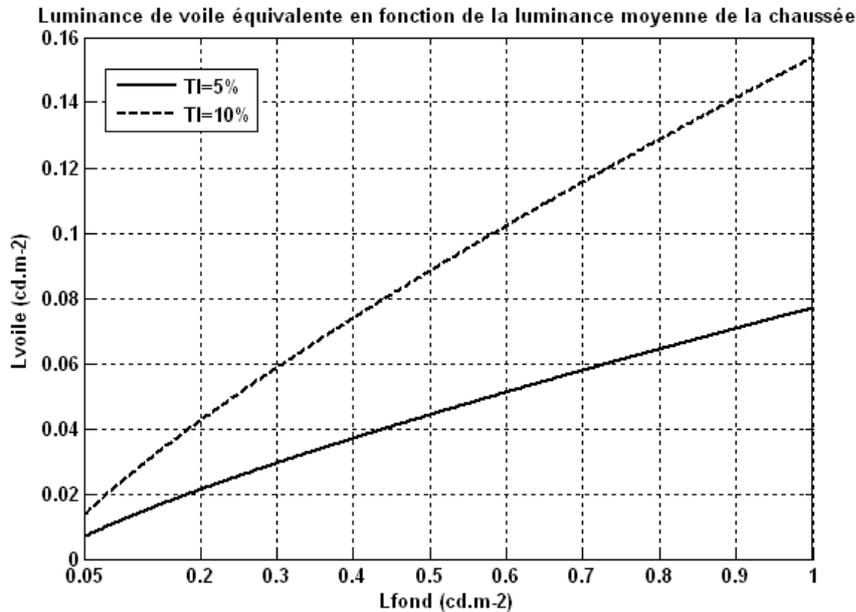
Cette norme ne prévoit le calcul et la mesure du TI que pour la partie de la chaussée utilisée par les véhicules motorisés. Cependant dans les communes rurales visées par la spécification de l'AFA, un lampadaire éclaire souvent à la fois la chaussée et le trottoir.

Ainsi on peut considérer que le calcul de l'augmentation relative du seuil de perception peut s'appliquer aussi bien à un piéton qu'à un automobiliste. En effet, au facteur de transmission près du pare-brise d'une voiture, un piéton et un automobiliste sont soumis au-même éclairage.

Néanmoins, afin de vérifier si le critère du TI adopté par la norme européenne ne peut pas être réévalué, on fera aussi les modélisations et calculs qui suivent pour TI=5%.

b) Conclusion

Par la suite on effectuera donc les calculs des seuils d'éclairement éblouissants (voir partie suivante) pour  $TI=5\%$  et  $TI=10\%$  afin de conclure laquelle de ces valeurs conviendrait à un éclairage urbain garantissant le confort de l'œil.



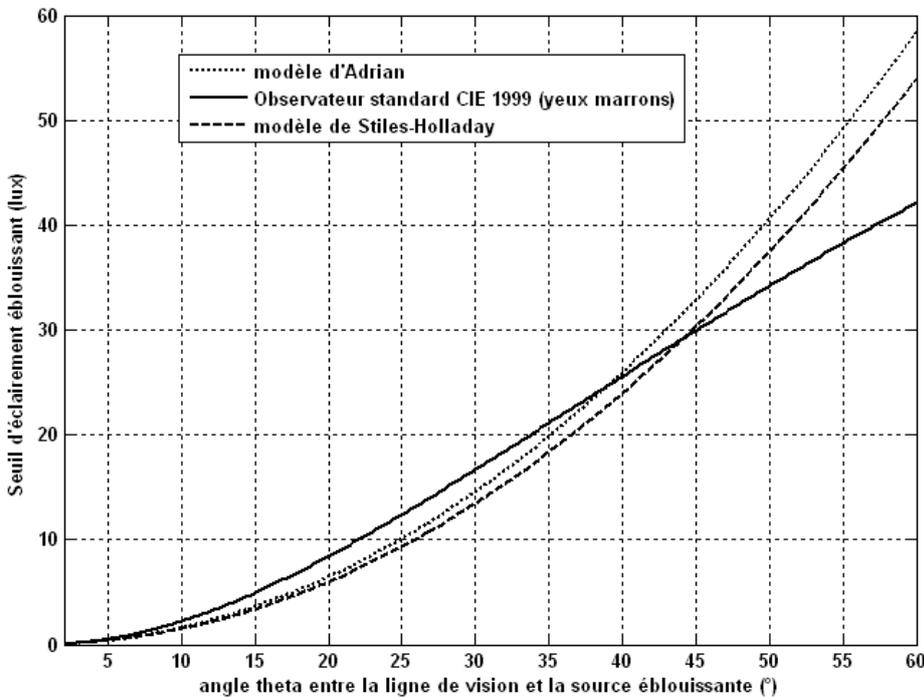
**Fig.III.2.2.1- Luminance de voile équivalente en fonction de la luminance de fond de la chaussée pour  $TI=10\%$  et  $TI=5\%$  et ce pour  $L_{\text{fond}}$  compris entre 0.05 et 1  $\text{cd.m}^{-2}$ .**

On peut déduire de ce graphique qu'il conviendra de limiter les sources éblouissantes de telle façon qu'elles n'occasionnent en aucun cas une luminance de voile équivalente supérieure à  $0.25 \text{ cd.m}^{-2}$  pour  $TI=10\%$  et  $0.13 \text{ cd.m}^{-2}$  pour  $TI=5\%$ .

Ces résultats nous permettent de tracer, à l'aide des modèles précédemment présentés (pp.11-12), les courbes d'éclairement maximum dans le plan de l'œil en fonction de l'angle d'arc entre la ligne de vision de l'observateur et la droite passant par le centre de la source éblouissante et l'œil de l'observateur. Ceci est l'objet du chapitre suivant.

### 2.3-Comparaison des différents modèles

Afin de déterminer s'il est bien nécessaire de faire les modélisations avec chacun des modèles mathématiques présentés en partie II, on a tracé le courbe d'éclairement correspondant à une luminance de voile équivalente de  $0.15 \text{ cd.m}^{-2}$  (correspondant à une situation avec une luminance moyenne de fond de la chaussée de  $1 \text{ cd.m}^{-2}$ ) pour  $\theta$  variant entre  $2^\circ$  et  $60^\circ$ .



**Fig.III.2.3.1- Comparaison des différents modèles de luminance de voile équivalente présentés pp.11-12 pour une luminance de voile de  $0.15 \text{ cd.m}^{-2}$  et un observateur de 23 ans. Ici  $\theta$  varie entre  $2^\circ$  et  $60^\circ$  et le seuil d'éclairement éblouissant ne vaut pas 0 pour  $\theta$  faible.**

Construction du graphique :

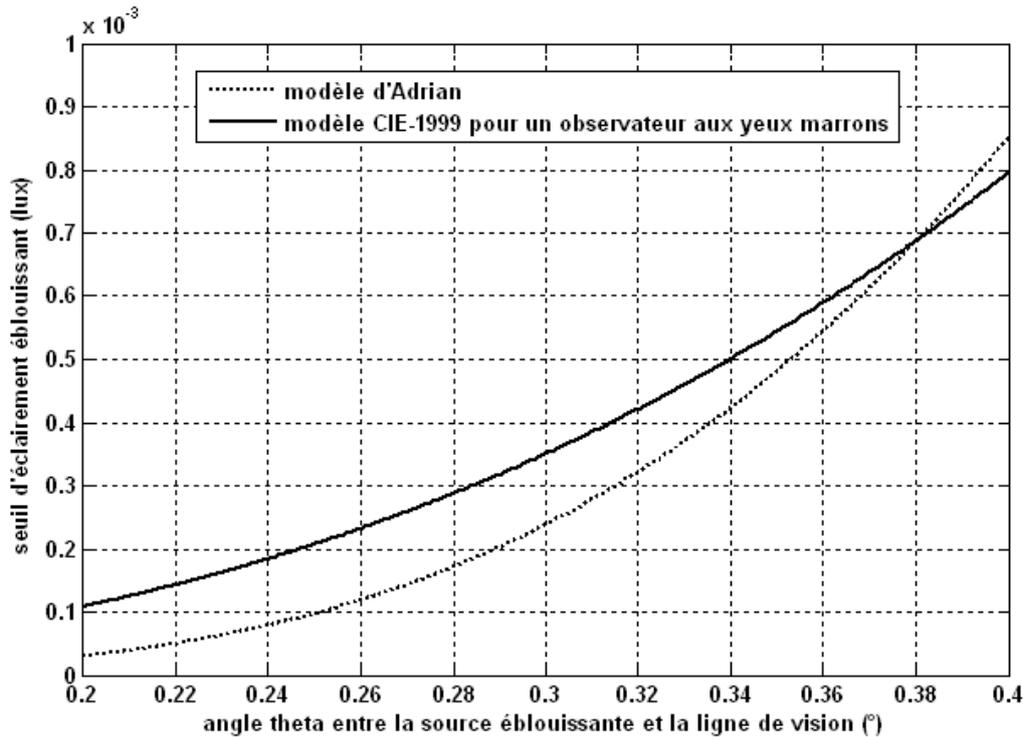
En fixant une luminance de voile équivalente, on peut, d'après les expressions (4), (5),(8) et (10) tracer le seuil d'éclairement éblouissant qui provoquerait cette luminance de voile équivalente pour l'œil ; et ce en fonction de l'angle entre la source éblouissante et la ligne de vision.

Ce seuil d'éclairement s'exprime dans le plan orthogonal à la ligne de vision et au niveau de l'œil.

Interprétation :

On peut constater que les différents modèles sont très proches mais que le modèle de l'observateur standard diffère des deux autres modèles aux grands angles, ceci est du au fait qu'il s'applique aussi pour  $60^\circ < \theta < 100^\circ$ .

Aux petits angles  $0.2^\circ < \theta < 2^\circ$  le modèle de la CIE est toujours valable et celui d'Adrian évolue selon l'expression (6) présente page 8. On obtient donc pour  $0.2^\circ < \theta < 0.4^\circ$  la figure suivante :



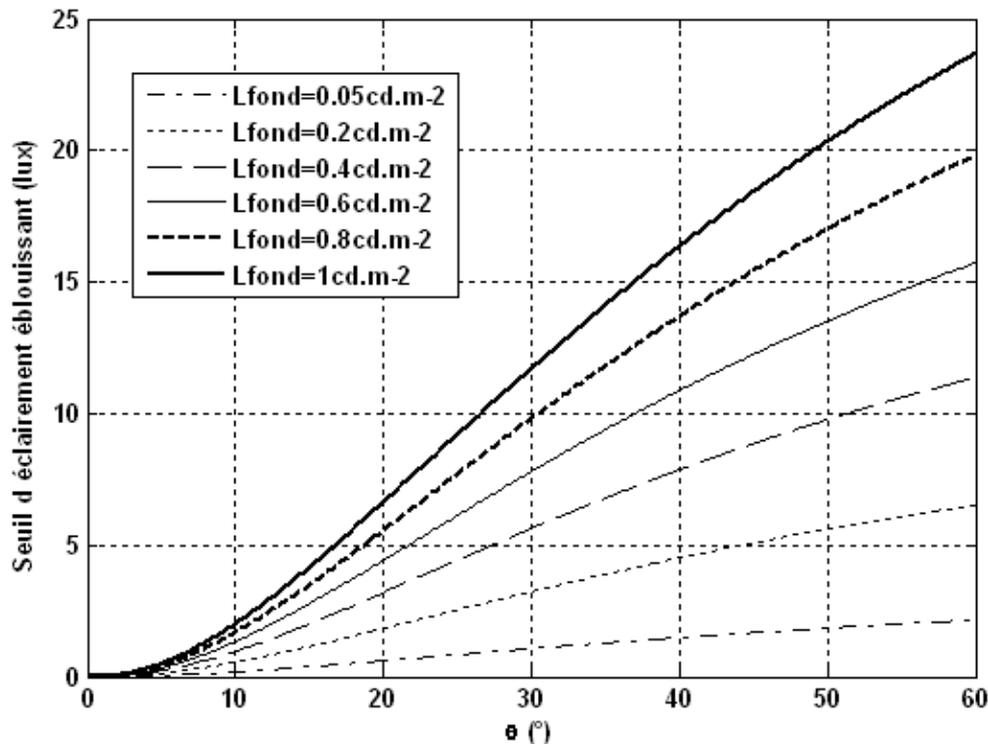
**Fig.III.2.3.2- Comparaison des différents modèles de luminance de voile équivalente présentés p.8-9 pour une luminance de voile de  $0.15 \text{ cd.m}^{-2}$  et un observateur de 23 ans. Ici  $\theta$  varie entre  $0.2^\circ$  et  $0.4^\circ$  et le seuil d'éclairement éblouissant ne vaut pas 0 pour  $\theta$  faible.**

Ces deux comparaisons aux grands et petits angles nous permettent donc de conclure que les modèles sont assez semblables et donnent des résultats cohérents entre eux. En conséquence puisque le modèle de l'observateur standard de la CIE recoupe bien les deux autres modèles sur l'intervalle de  $2^\circ < \theta < 60^\circ$  et  $0.2^\circ < \theta < 2^\circ$  et qu'il s'étend à  $60^\circ < \theta < 100^\circ$ , on le prendra comme modèle de référence par la suite.

## 2.4- Application des critères précédemment définis au calcul de l'éclairement maximal dans le plan de l'œil

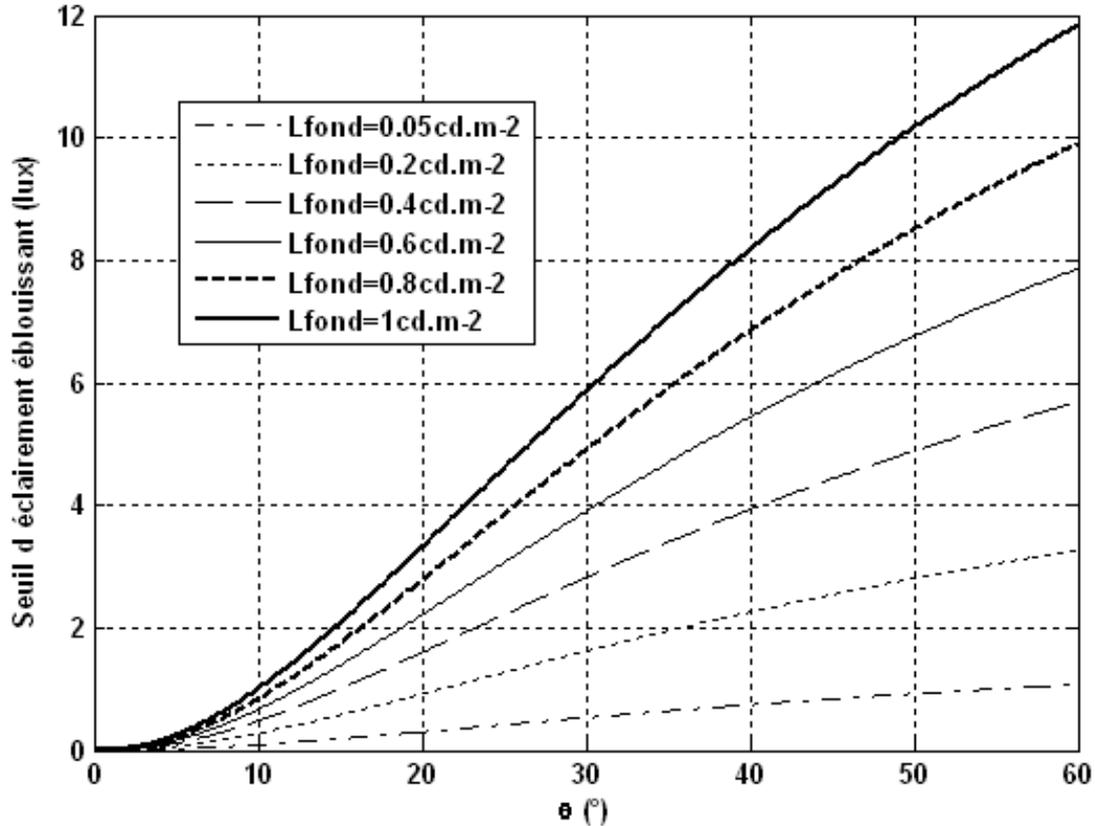
La partie 2.3 nous ont permis de retenir le modèle de l'observateur standard CIE-1999 comme modélisation mathématique de l'éblouissement en milieu urbain. La partie 2.2 a permis de conclure à la mise en œuvre des modélisations d'éblouissement pour  $TI=5\%$  et  $TI=10\%$ .

Nous pouvons maintenant tracer les courbes correspondant au seuil d'éclairement éblouissement  $E$  dans le plan de l'œil de l'observateur correspondant à une augmentation relative du seuil de perception de 10% et 5% pour différentes valeurs de luminance de fond de la chaussée  $L_{fond}$  en fonction de l'angle  $\theta$  entre la ligne de vision de l'observateur et la droite passant par le centre de la source et l'œil.



**Fig.III.2.4.1- Seuil d'éclairement dans le plan situé devant l'œil, normal à la ligne de vision, en fonction de l'angle  $\theta$  entre la source éblouissante et la ligne de vision et pour différentes valeurs  $L_{fond}$  de la luminance moyenne de la chaussée. Cette situation correspond à  $TI=10\%$ .**

Nota : Le seuil d'éclairement éblouissant pour  $\theta$  petit devant  $1^\circ$  ne vaut pas 0 lux comme le graphique le suppose, on pourra se référer à la partie 2.3 pour plus de précisions sur le modèle aux petits angles.



**Fig.III.2.4.2-** Seuil d'éclairement dans le plan situé devant l'œil, normal à la ligne de vision, en fonction de l'angle  $\theta$  entre la source éblouissante et la ligne de vision et pour différentes valeurs  $L_{fond}$  de la luminance moyenne de la chaussée. Cette situation correspond à  $TI=5\%$ .

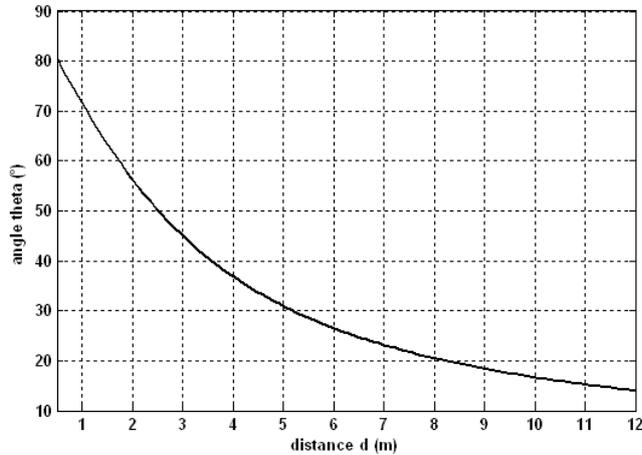
Exemple d'interprétation en fonction de la distance  $d$  entre l'observateur et projection orthogonale de la source éblouissante au sol

On considère un luminaire de hauteur 4.5m, un observateur dont les yeux sont à 1.5m du sol, et une visée horizontale sous le luminaire (on se place dans le cas le plus défavorable). L'angle d'arc  $\theta$  entre la ligne de vision et la droite passant par le centre de la source éblouissante est alors donnée par :

$$\theta = \arctan\left(\frac{3}{d}\right) \quad (17)$$

où  $d$  est la distance au pied du luminaire.

Et on obtient le graphique suivant :



**Fig.III.2.4.3- Angle d'arc  $\theta$  entre la ligne de vision de l'observateur et la droite passant par le centre la source et l'œil en fonction de la distance d de l'observateur à la projection orthogonale du luminaire sur le plan de la chaussée**

Plaçons nous dans un cas défavorable, loin de la source (à plus de 8 mètres), là où l'angle entre la ligne de vision et la source est petit.

D'après le précédent rapport Opto-Services (Réf.[9]) l'ensemble des luminaires qui avaient été caractérisés dans la commune de Mortagne-au-Perche ne fournissait pas un éclairage au sol dans un plan horizontal de plus de 4 lux à plus de 8 mètres du luminaire. Cela correspond à une luminance moyenne de la chaussée n'excédant pas  $0.2 \text{ cd.m}^{-2}$ .

Si on se réfère à la Fig.III.2.4.1, correspondant donc à TI toléré de 10%, le seuil d'éclairage éblouissant correspondant à cette situation est de 3 lux. Pour un TI de 5%, on a d'après la Fig.III.2.4.2 un seuil d'éclairage éblouissant de 1.5 lux.

Ces luminaires rempliraient donc presque le critère de non-augmentation du seuil de perception relative de plus de 10% mais ne rempliraient pas le critère correspondant à  $TI \leq 5\%$ .

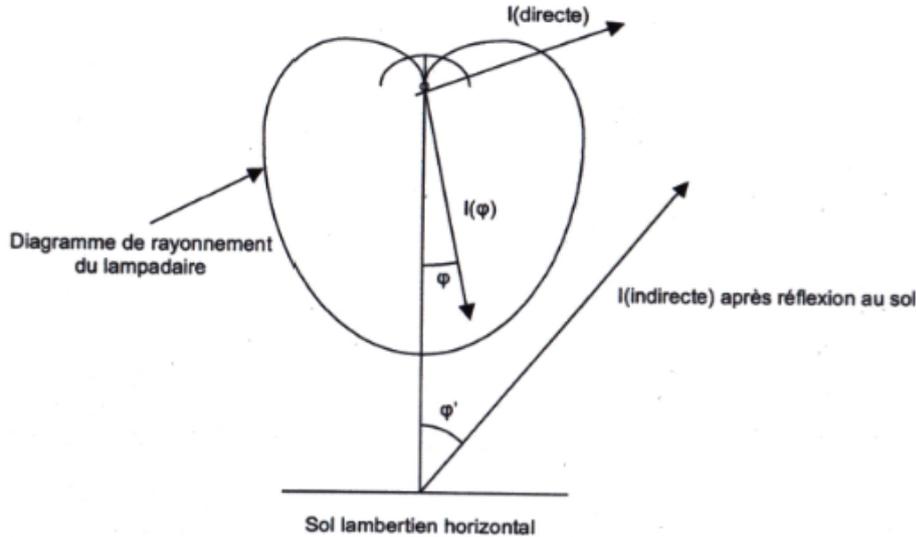
#### Interprétation des graphiques :

De manière générale, lorsqu'on se base sur la Fig.III.2.4.1 on peut conclure que dans tous les types de configurations de luminances moyennes au sol comprises entre  $0.2$  et  $1 \text{ cd.m}^{-2}$  et pour tous les angles  $\theta$  supérieurs à  $20^\circ$ , l'éclairage dans le plan de l'œil ne doit pas dépasser **3 lux** pour ne pas occasionner d'augmentation relative du seuil de perception de plus de **10%**. Tandis que pour ne pas dépasser le critère de **TI=5%**, l'éclairage dans le plan de l'œil ne doit pas dépasser **1.5 lux**.

On notera, en interprétant la Fig.III.2.4.3, que pour  $\theta < 10^\circ$  l'observateur se trouverait à plus de 15 m de la source éblouissante, à cette distance, aucun des luminaires expertisés dans le rapport Opto-Services précédent (Réf.[9]) ne fournissait un éclairage au sol supérieur à 2 lux.

### 2.5-Hauteur optimale d'un luminaire

L'approche développée en 2.4 n'étant pas suffisante pour définir clairement des critères de disposition des luminaires dans une rue, on choisit maintenant de s'intéresser à la hauteur minimale  $h$  d'un lampadaire pour qu'il vérifie le critère de non-éblouissement.



**Fig.III.2.5.1- Géométrie du modèle de rayonnement d'un lampadaire bafflé (Réf.15)**

Dans le modèle qu'on adopte (Réf.[15]), le rayonnement angulaire du lampadaire est donné par la loi d'intensité suivante :

$$I(\varphi) = I_0 \left| \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right|^n \quad (18)$$

Avec :

- $I(\varphi)$  : intensité du lampadaire dans la direction de la droite faisant un angle  $\varphi$  par rapport au nadir. (en cd)
- $I_0$  : l'intensité nominale au nadir, en cd.
- $n$  : coefficient de puissance du  $\cos(\varphi/2)$ , ajustable en fonction du lampadaire, la Réf.[15] établit qu'un lampadaire convenablement bafflé (typique des zones urbaines) a au minimum  $n=4$ . Pour un lampadaire boule,  $n=0$ .

On a aussi :

$$F_{tot} = \int_0^\pi 2\pi I(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi \quad (19)$$

Avec  $F_{tot}$  le flux total de la lampe en lumens (données constructeurs). On peut en déduire l'expression de  $I_0$  en fonction de  $F_{tot}$  :

$$F_{tot} = \int_0^\pi 2\pi I(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi = 2\pi I_0 \int_0^\pi \left( \frac{\cos(\varphi) + 1}{2} \right)^{n/2} \sin(\varphi) d\varphi = -\frac{8\pi I_0}{n+2} \left[ \left( \frac{\cos(\varphi) + 1}{2} \right)^{\frac{n+2}{2}} \right]_0^\pi \quad (20)$$

Soit :

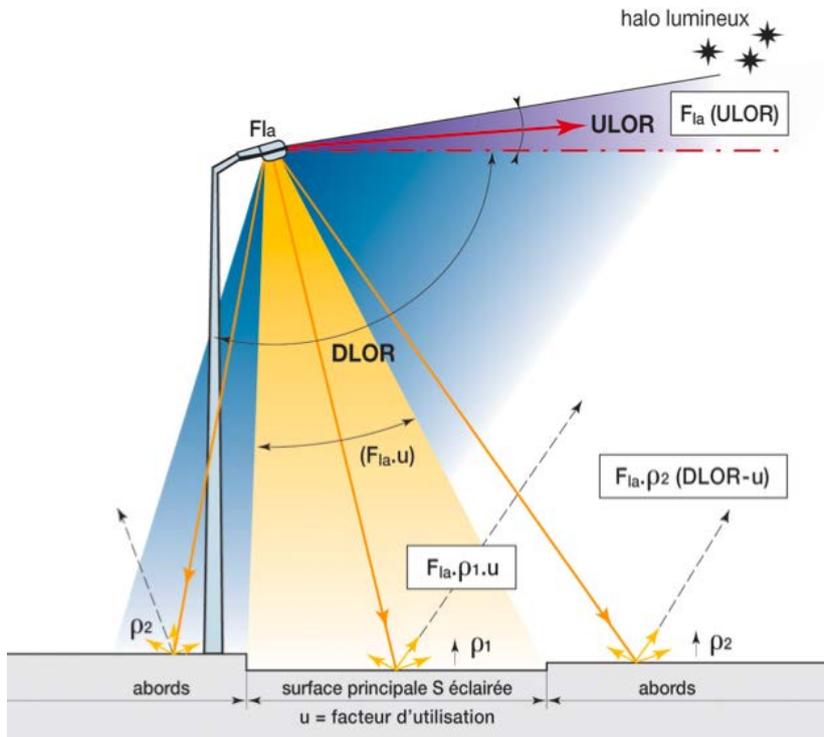
$$F_{tot} = \frac{8\pi I_0}{n+2} \Rightarrow I_0 = \frac{n+2}{8\pi} F_{tot} \quad (21)$$

Le rayonnement angulaire du lampadaire peut ainsi s'exprimer :

$$I(\varphi) = \frac{n+2}{8\pi} F_{tot} \left| \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right|^n \quad (22)$$

Rappel sur le paramètre ULOR

Un paramètre important associé au coefficient n est le ULOR (pour Upward Light Output Ratio: fraction du flux émise en direction du zenith). Ce paramètre représente la fraction de flux émise au-dessus de l'horizon par le luminaire (voir Fig.III.2.5.2).



**Fig.III.2.5.2- Représentation des fractions de flux émis par un luminaire au-dessus de l'horizon (ULOR) et en-dessous de l'horizon (DLOR), d'après Réf.[18]**

Si on note  $F_1$  le flux du lampadaire émis au-dessus de l'horizon, on a :

$$F_1 = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} 2\pi I(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} 2\pi \cos^n\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin(\varphi) d\varphi = \frac{F_{tot}}{2^{\frac{n+1}{2}}} \quad (23)$$

Ainsi on peut estimer le ULOR, en négligeant la partie du flux réfléchi par le sol au-dessus de l'horizon, par :

$$ULOR = \frac{F_1}{F_{tot}} = \frac{1}{2^{\frac{n+1}{2}}} \quad (24)$$

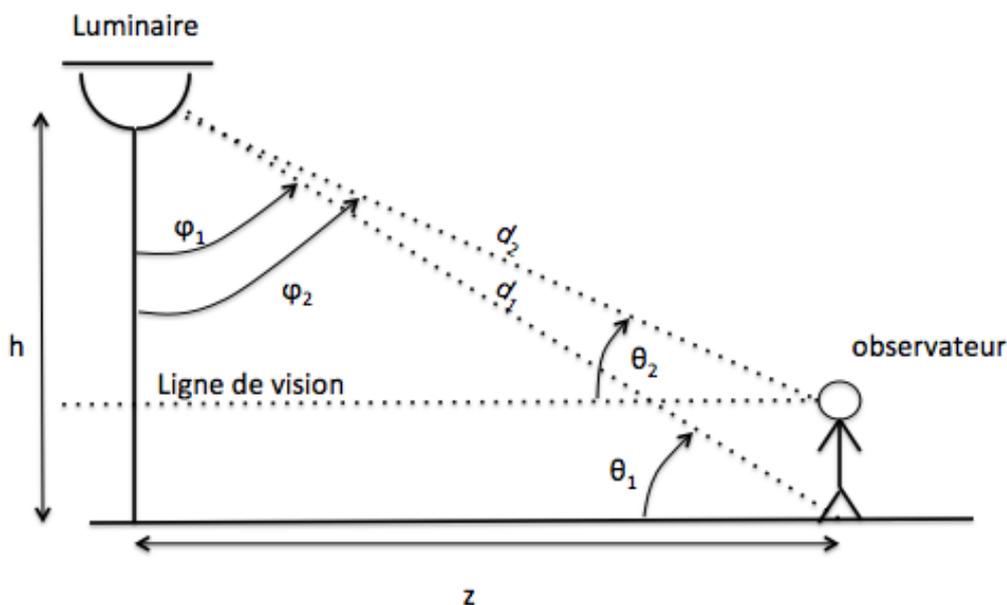
On peut ainsi obtenir une estimation de la fraction de flux émise au-dessus de l'horizon pour différents coefficients de rayonnement angulaire  $n$  :

$n$	ULOR : fraction du flux émis au-dessus de l'horizon (%)
0 (lampadaire boule)	50
2	25
4	12.5
6	6.25
8	3.13
10	1.56
$\geq 12$	$\leq 1$
$\geq 17$	$\leq 0.1$

Ainsi dans la suite de l'étude, on traitera le problème pour des coefficients  $n$  valant 4,6,8,10 afin d'estimer l'importance du bafflage des luminaires pour l'éblouissement de l'œil d'un piéton.

#### Modélisation de l'éblouissement d'un piéton en présence d'un luminaire :

Pour notre modélisation de l'éblouissement on s'appuiera sur le schéma suivant :



**Fig.III.2.5.3-Modélisation d'une situation d'éblouissement d'un piéton par un luminaire.**

On s'est délibérément placé dans un cas défavorable où le piéton regarde à l'horizon. En effet, de nuit, un piéton a plutôt tendance à regarder en direction du sol. Le cas où il regarde à l'horizon constitue donc une situation défavorable car l'angle entre sa ligne de vision et la source éblouissante diminue.

On considérera qu'ici la chaussée est une surface lambertienne d'albédo  $\rho=0.15$ , que les yeux du piéton se trouvent à 1.5m au dessus du sol. L'éclairement au niveau du sol  $E_{sol}$  et dans le plan des yeux du piéton  $E_{oeil}$  sont alors donnés par la loi de Bouguer :

$$E_{sol}(z, h) = \frac{I(\varphi_1) \sin(\theta_1)}{h^2 + z^2} \quad (25)$$

$$E_{oeil}(z, h) = \frac{I(\varphi_2) \cos(\theta_2)}{(h-1.5)^2 + z^2} \quad (26)$$

Où :

- $\varphi_1 = \arctan\left(\frac{z}{h}\right)$  et  $\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \varphi_1$
- $\varphi_2 = \arctan\left(\frac{z}{h-1.5}\right)$  et  $\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \varphi_2$ .

On peut alors en déduire la luminance de fond de la chaussée  $L_{fond}$ , et par la suite, avec l'expression (11), la luminance de voile équivalente  $L_{voile}$  tolérable pour un TI fixé et une luminance de fond donné :

$$L_{fond}(z, h) = \frac{\rho E_{sol}(z, h)}{\pi} = \frac{\rho I(\varphi_1) \sin(\theta_1)}{\pi(h^2 + z^2)} = \frac{\rho(n+2)F_{tot} \left| \cos\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) \right|^n \cos(\varphi_1)}{8\pi^2(h^2 + z^2)} \quad (27)$$

$$L_{voile}(z, h) = \frac{\pi \cdot L_{fond}^{0.8}(z, h)}{65} \quad (28)$$

Ainsi, à une distance  $z$  du pied du lampadaire de hauteur  $h$  et, en connaissant  $F_{tot}$  et en fixant l'augmentation relative de perception maximale tolérable (TI), on peut déduire la luminance de voile équivalente maximale tolérable et par le modèle de l'observateur standard CIE-1999 (10) remonter au seuil d'éclairement éblouissant  $E_{seuil}(z, h)$  dans le plan de l'œil. Les expressions (10), (25) et (27) donnent donc :

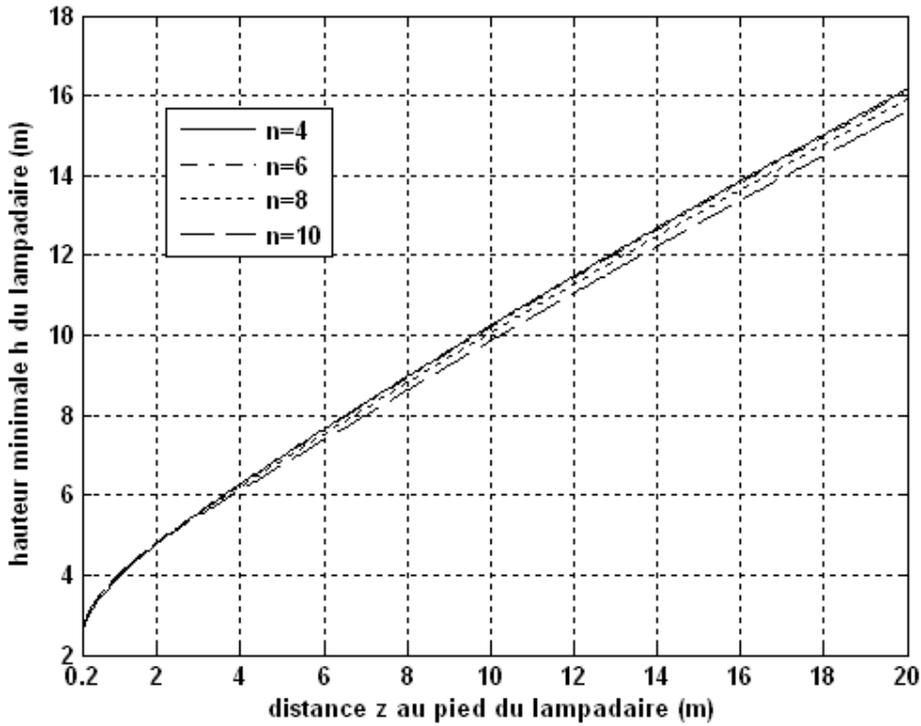
$$E_{seuil}(z, h) = L_{voile}(z, h) \cdot \left[ \frac{10}{\theta_2^3} + \left( \frac{5}{\theta_2^2} + \frac{0.12}{\theta_2} \right) \cdot \left( 1 + \left( \frac{23}{62.5} \right)^4 \right) + 3e-3 \right]^{-1} \quad (28)$$

On a ici pris  $\rho=0.5$  dans l'expression (10), ce qui correspond à un observateur aux yeux foncés.

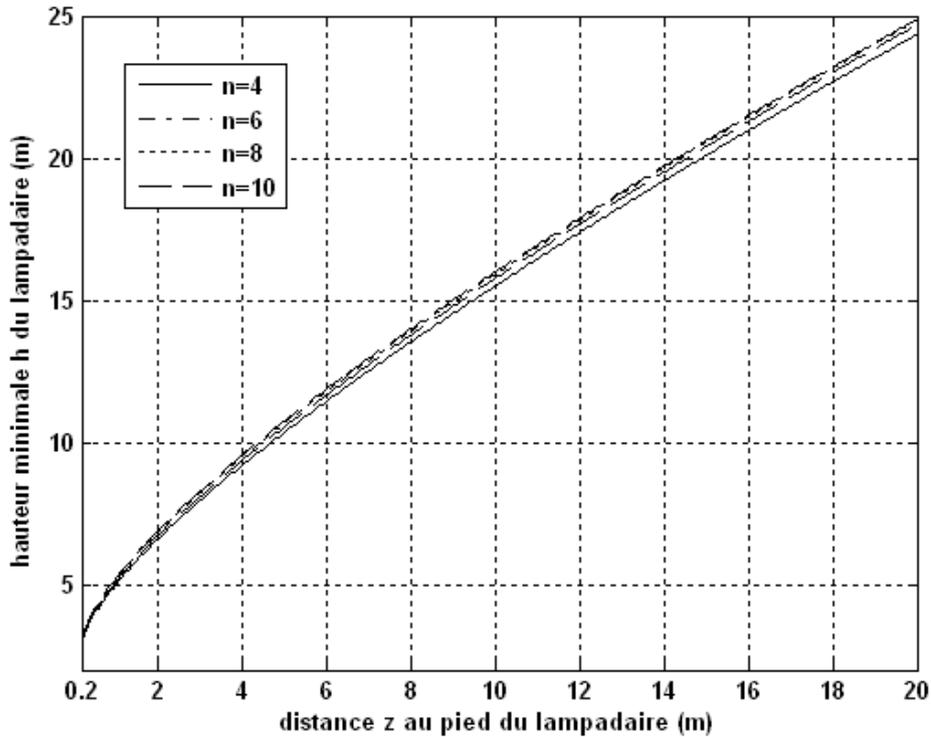
$$E_{seuil}(z, h) = \frac{\pi}{65} \cdot \left( \frac{\rho(n+2)F_{tot} \left| \cos\left(\frac{\varphi_1}{2}\right) \right|^n \cos(\varphi_1)}{8\pi^2(h^2 + z^2)} \right)^{0.8} \cdot \left[ \frac{10}{\theta_2^3} + \left( \frac{5}{\theta_2^2} + \frac{0.12}{\theta_2} \right) \cdot \left( 1 + \left( \frac{23}{62.5} \right)^4 \right) + 3e-3 \right]^{-1}$$

(29)

On peut donc à l'aide d'un logiciel de calcul numérique évaluer la hauteur de seuil pour laquelle on aurait dans le plan de l'œil :  $E_{seuil}(z, h) = E_{oeil}(z, h)$ . Les graphiques qui suivent sont basés sur des paramètres réels existant dans la commune de Mortagne-au-Perche (Réf.[9]).



**Fig.III.2.5.4-** Hauteur minimale du lampadaire garantissant un  $TI \leq 10\%$  en fonction de la distance au pied du lampadaire. On a pris un lampadaire bafflé ( $n=4,6,8,10$ ) et de flux total émis 6000 lm.



**Fig.III.2.5.5-** Hauteur minimale du lampadaire garantissant un  $TI \leq 5\%$  en fonction de la distance au pied du lampadaire. On a pris un lampadaire bafflé ( $n=4,6,8,10$ ) et de flux total émis 6000 lm.

Interprétation :

On remarque tout d'abord que le coefficient  $n$  quantifiant le bafflage d'un luminaire influe peu sur la hauteur optimale du luminaire garantissant un non-éblouissement, et ce pour un critère de non-éblouissement  $TI \leq 10\%$  ou  $TI \leq 5\%$ .

De plus on pourra trouver en annexe (Fig.VII.1) le graphique donnant la hauteur minimale du lampadaire en fonction de la distance du piéton au pied du lampadaire, pour  $n=4,6,8,10$  et un flux total émis de 30000 lm. On remarque sur ce graphique que la hauteur optimale ne dépend quasiment pas de  $n$ .

Ainsi, puisque le coefficient  $n$  influe peu sur la hauteur minimale d'un luminaire lorsqu'on change soit le critère  $TI$ , soit le flux total émis par le lampadaire, on effectuera par la suite les modélisations pour un unique  $n=8$ , ce qui correspond à un ULOR de 3%.

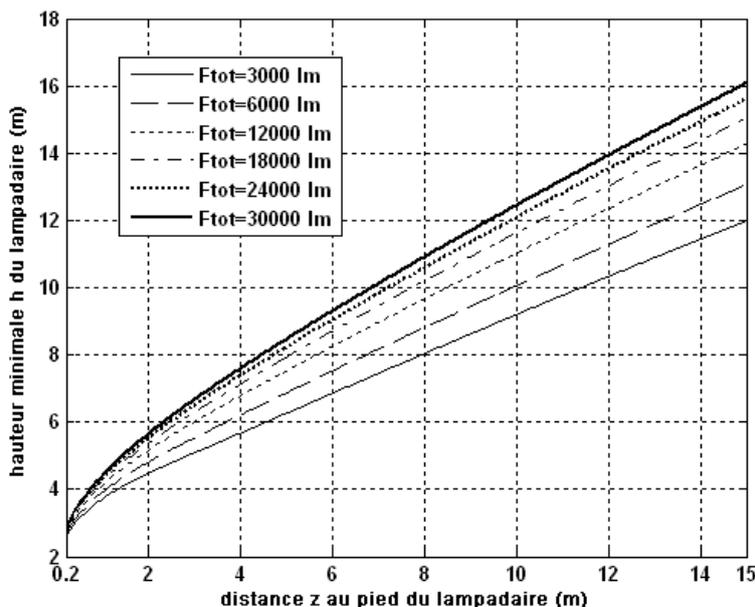
On peut donc conclure qu'à une distance  $z=10\text{m}$  du pied du lampadaire, la hauteur du lampadaire garantissant  $TI \leq 10\%$  est  $h \geq 10\text{m}$ , tandis que pour garantir  $TI \leq 5\%$  on doit avoir  $h \geq 15\text{m}$ . En réalité le mât du lampadaire faisait entre 3 et 4 mètres (Réf.[9]).

Comparaison entre un lampadaire fournissant un éclairage au sol maximal de 20 lux et un autre 5 lux :

Prenons une situation où on a un lampadaire émettant un flux total de 6000 lm et bafflé,  $n=8$ . Pour que l'éclairage maximal au sol soit respectivement de 5 lux et 20 lux on doit avoir  $h_5=21.85\text{m}$  et  $h_{20}=10.9\text{m}$ . En effet d'après la loi de Bouguer on a au nadir (où l'intensité angulaire est maximale) :

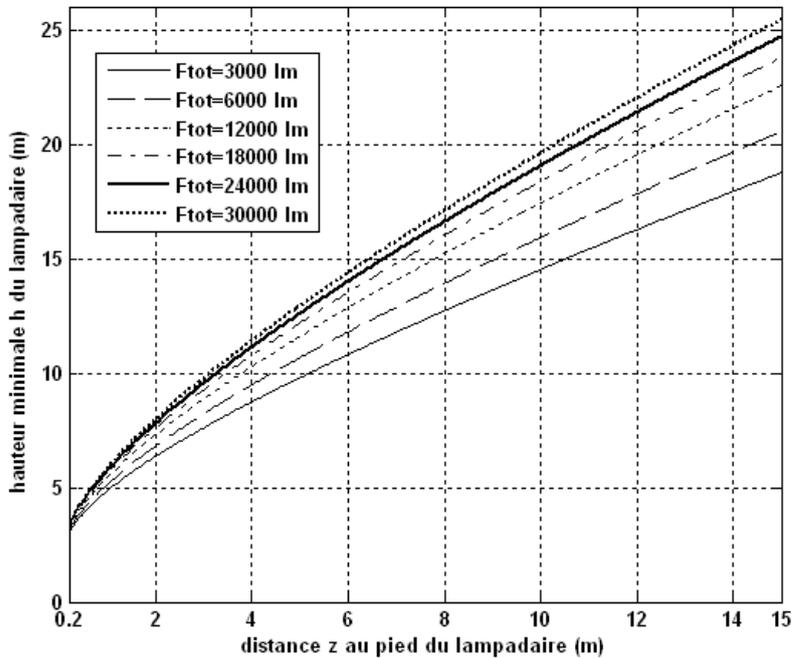
$$E_{sol} = \frac{I_0}{h^2} = \frac{(n+2)F_{tot}}{8\pi h^2} \quad (30)$$

Ainsi, d'après les figures III.2.5.3 et III.2.5.2, on peut voir que le lampadaire fournissant 5 lux d'éclairage maximal au sol respecte les critères  $TI \leq 5\%$  et donc  $TI \leq 10\%$  tandis que le lampadaire fournissant 20 lux d'éclairage maximal au sol ne respecte que le critère  $TI \leq 10\%$ .

Influence du flux total émis :

**Fig.III.2.5.6- Hauteur minimale d'un lampadaire bafflé ( $n=8$ ) respectant  $TI \leq 10\%$  pour différents flux totaux émis et pour une distance  $z$  au pied du lampadaire comprise entre 0.2 et 15m**

On voit donc que tous les luminaires bafflés de type  $n=8$  émettant entre 3000 et 30000 lm doivent avoir une hauteur de mât supérieure à 12 mètres pour garantir une augmentation relative de perception inférieure ou égale à 10% jusqu'à une distance de 15 mètres de leur pied.



**Fig.III.2.7- Hauteur minimale d'un lampadaire bafflé ( $n=8$ ) respectant  $TI \leq 5\%$  pour différents flux totaux émis et pour une distance  $z$  au pied du lampadaire comprise entre 0.2 et 15m**

On voit donc que tous les luminaires bafflés de type  $n=8$  émettant entre 3000 et 6000 lm doivent avoir une hauteur de mât supérieure à 20 mètres pour garantir une augmentation relative de perception inférieure ou égale à 5% jusqu'à une distance de 15 mètres de leur pied. Pour les lampadaires émettant un flux total plus important jusqu'à 30000 lm il faut une hauteur minimale de mât de plus de 25 mètres, ce qui paraît inconcevable dans un milieu urbain.

### 3-Spécifications sur l'éblouissement perturbateur

Au regard des résultats de cette partie deux conclusions s'imposent :

- pour ne pas imposer des hauteurs de mâts démesurés aux lampadaires, ces derniers doivent émettre un flux inférieurs à 6000 lm (Fig.III.2.6, III.2.7), la hauteur optimale de leur mât serait alors 12 mètres pour garantir un  $TI \leq 10\%$  sur une distance de 15 mètres à partir de leur pied.
- Le critère du  $TI \leq 5\%$  semble irréalisable dans le cadre d'un éclairage urbain au vu des hauteurs de mât de lampadaires requises. On privilégiera donc de suivre la recommandation de la norme européenne (qui s'applique aux parties de la chaussée empruntées par les automobilistes, mais qu'on a ici généralisé aux trottoirs) (Réf.[13]), à savoir, ne pas dépasser une augmentation relative de perception de 10%.

Finalement, les résultats du III.2.5 et III.2.6 nous permettent de spécifier les critères suivants quant à un éclairage non-éblouissant :

- Pour garantir une augmentation relative de perception inférieure à 10%, on recommande de mettre en place des luminaires fournissant un éclairage moyen au sol maximal de 3 lux.
- Les luminaires garantissant ce même critère et fournissant un flux total émis supérieur à 3000 lm devront avoir une hauteur de mât supérieur à 12 mètres.

## IV-Eblouissement de l'œil en situation depuis un site astronomique

### 1-Mise en Situation

On se place dans cette partie dans une zone de type C, telle que décrite dans l'expression du besoin de l'AFA, à savoir les zones agricoles, privées ou naturelles en dehors des zones immédiatement périphériques aux zones urbanisées.

L'observateur est en situation depuis un site astronomique définie comme une zone de type C et doit pouvoir observer une étoile de magnitude 6 à 20° au dessus de l'horizon (voir Fig.IV.2.3) Dans ces conditions le calcul de l'augmentation relative de perception n'est plus valable car la luminance ambiante est inférieure à 0.05 cd.m<sup>-2</sup> (bas niveau scotopique).

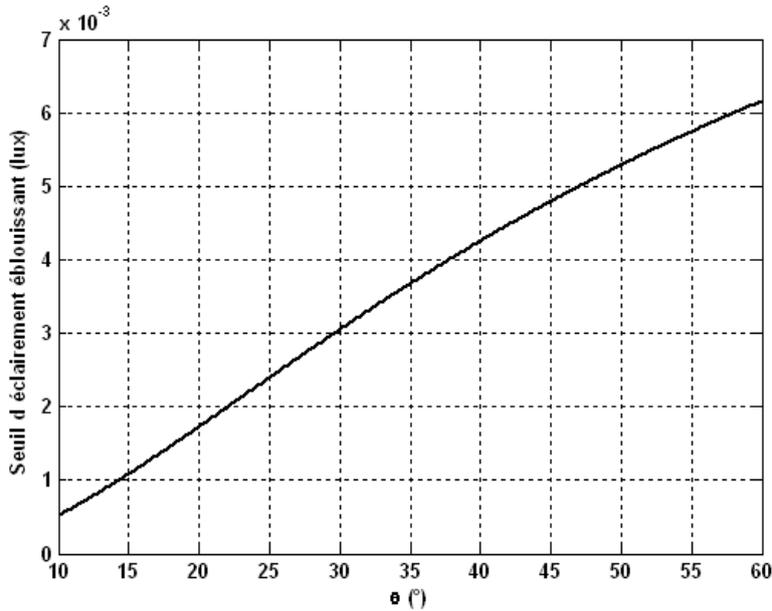
Cependant l'étude Opto Services sur la pollution lumineuse (Réf.[15]) a conclu que pour observer une étoile de magnitude 6 à 20° au dessus de l'horizon la luminance du fond du ciel ne devait pas excéder une magnitude apparente de  $7 \cdot 10^{-4} \text{ cd.m}^{-2}$  ( $m=20.8 \text{ mag.arcsec}^{-2}$ ). Or, P. Cinzano (Réf.[10]) a montré qu'un ciel exceptionnellement sombre a une luminance au zénith de  $2 \cdot 10^{-4} \text{ cd.m}^{-2}$  ( $m=22.1 \text{ mag.arcsec}^{-2}$ ) et un ciel de bonne qualité a une luminance au zénith de  $4 \cdot 10^{-4} \text{ cd.m}^{-2}$  ( $m=21.4 \text{ mag.arcsec}^{-2}$ ).

On se placera dans le deuxième cas, et sachant qu'il s'agit d'une valeur de luminance au zénith, on ne tolérera une valeur de la luminance de voile équivalente qu'inférieure ou égale à 10% de  $4 \cdot 10^{-4} \text{ cd.m}^{-2}$  soit  $4 \cdot 10^{-5} \text{ cd.m}^{-2}$  ( $m=23.8 \text{ mag.arcsec}^{-2}$ ) soit une contribution de 6% à la luminance du fond de ciel limite pour pouvoir observer l'étoile de magnitude 6.

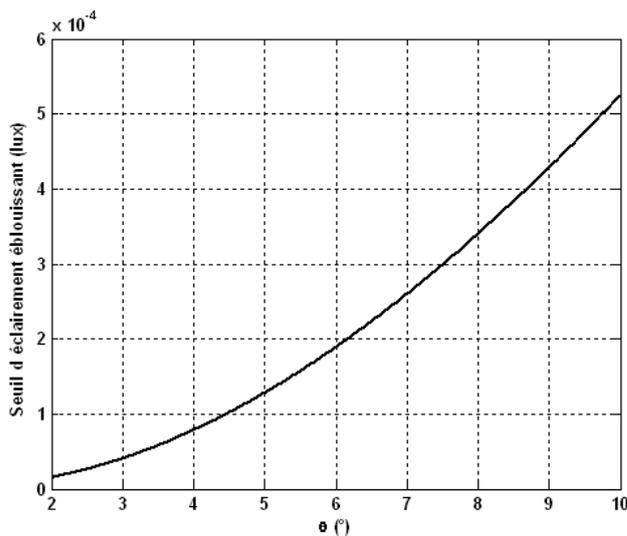
## 2-Eblouissement perturbateur

Comme on l'a expliqué page 10, les modèles calculant la luminance de voile équivalente en fonction de l'éclairement de la source éblouissante restent valables aux bas niveaux lumineux puisque la diffusion de lumière intraoculaire peut être considéré comme linéaire aux bas niveaux lumineux.

On appliquera donc toujours le modèle de l'observateur standard de la CIE définie par l'expression (10). On en déduit le graphique suivant :

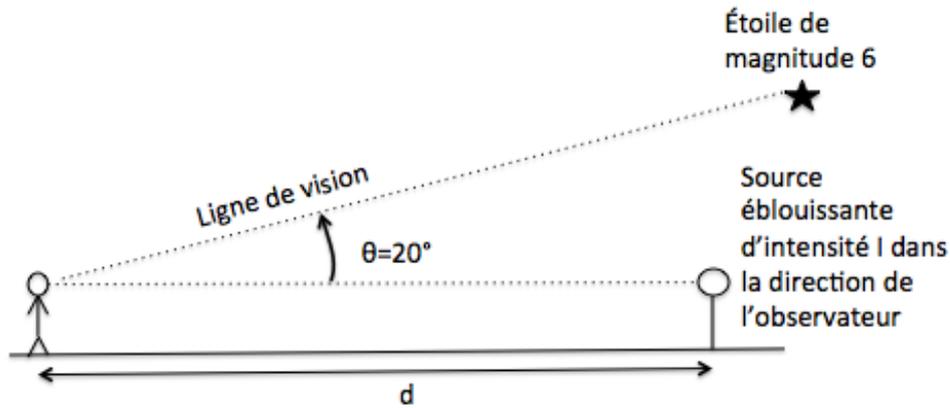


**Fig.IV.2.1-** seuil d'éclairement éblouissant dans le plan de l'œil en fonction de l'angle  $\theta$  entre la ligne de vision de l'observateur et la source éblouissante pour une luminance de voile équivalente de  $4.10^{-5} \text{ cd.m}^{-2}$



**Fig.IV.2.2-** seuil d'éclairement éblouissant (aux petits angles) dans le plan de l'œil en fonction de l'angle  $\theta$  entre la ligne de vision de l'observateur et la source éblouissante pour une luminance de voile équivalente de  $4.10^{-5} \text{ cd.m}^{-2}$

En pratique sur un site astronomique de si bas niveaux d'éclairement nécessiteraient un équipement onéreux pour être correctement mesurés. On peut donc plutôt chercher à exprimer la distance à partir de laquelle une source d'intensité donnée ne dépasse pas le seuil d'éclairement éblouissant dans le plan de l'œil.



**Fig.IV.2.3-Modélisation de la situation d'observation d'une étoile de magnitude 6 à 20° au-dessus de l'horizon depuis un site astronomique et en présence d'une source éblouissante**

On se place volontairement dans le cas le plus défavorable, l'étoile à observer se trouve dans le même plan zénithal que la source éblouissante. On considère que la source éblouissante (typiquement un lampadaire) est suffisamment éloignée de l'observateur pour que l'angle d'arc entre la droite passant par la source éblouissante et l'œil de l'observateur soit négligeable devant 20°.

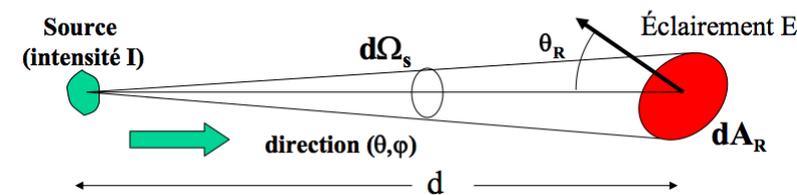
Sachant que nous avons fixé une luminance de voile équivalente maximale  $L_{voile}$  de  $4 \cdot 10^{-5} \text{ cd.m}^{-2}$ , on peut en déduire à partir du modèle de l'observateur standard ébloui CIE-1999 (10) que le seuil d'éclairement éblouissant  $E_{seuil}$  dans le plan de l'œil est :

$$E_{seuil} = L_{voile} \cdot \left[ \frac{10}{\theta^3} + \left( \frac{5}{\theta^2} + \frac{0.12}{\theta} \right) \left( 1 + \left( \frac{23}{62.5} \right)^4 \right) + 3 \cdot 10^{-3} \right]^{-1} \quad (31)$$

Ici, dans la configuration de la figure IV.2.3 on a  $\theta=20^\circ$  et  $L_{voile}=4 \cdot 10^{-5} \text{ cd.m}^{-2}$  et donc  $E_{seuil}=1.7 \cdot 10^{-3} \text{ lux}$ .

Mais la loi de Bouguer donne (Fig.IV.2.4 et IV.2.3) :

### Loi de Bouguer



**Fig.IV.2.4 (Réf.[16])**

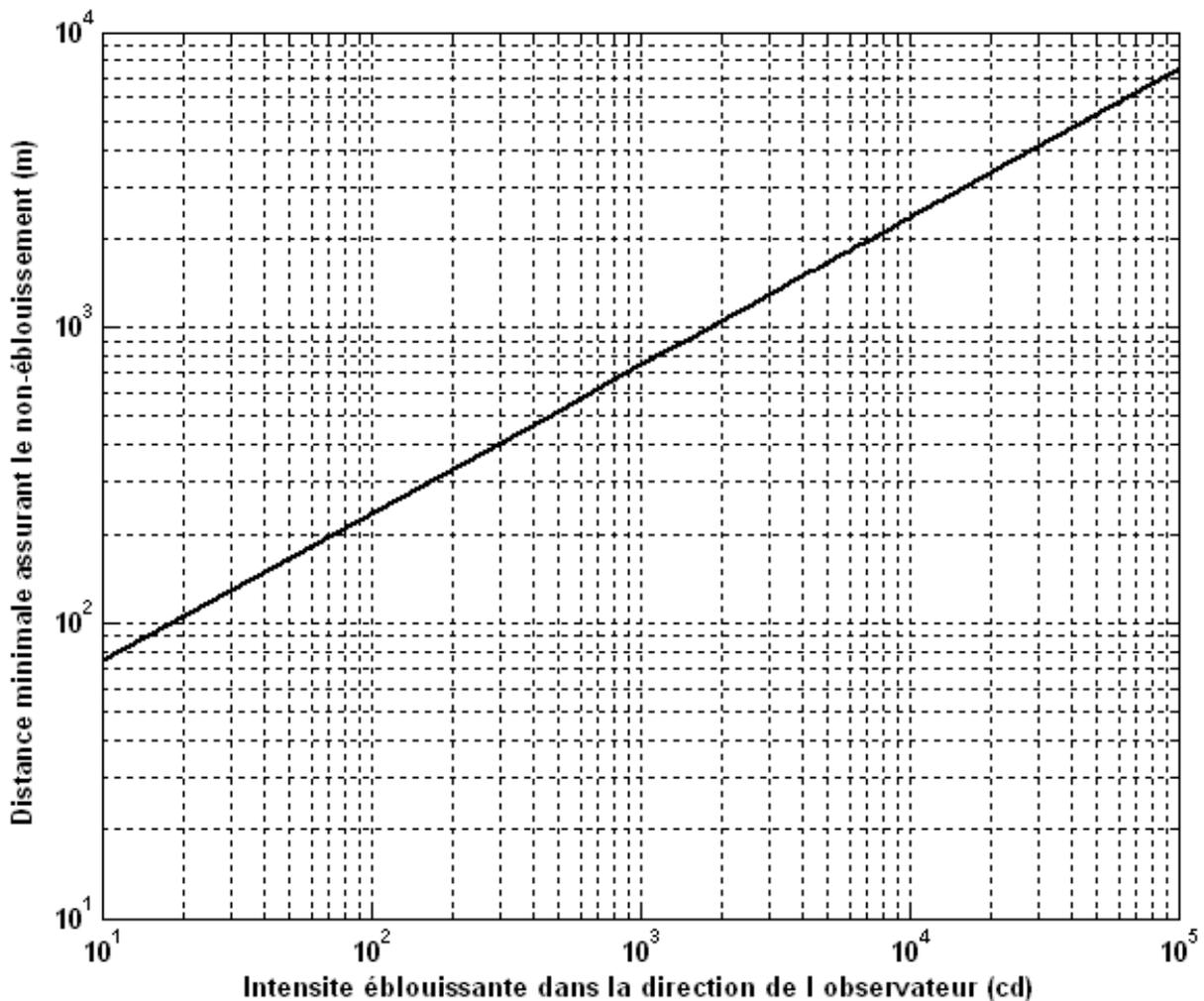
$$E_{seuil} = \frac{I_{eb} \cos(\theta)}{d^2} \tag{32}$$

On peut donc en déduire la distance minimale  $d$  entre l'observateur et la source à partir de laquelle la source d'intensité éblouissante  $I_{eb}$  (en cd) dans la direction de l'observateur ne gênera plus l'observation d'une étoile de magnitude 6 à 20° au-dessus de l'horizon.

$$d = \sqrt{\frac{I_{eb} \cos(\theta)}{E_{seuil}}} \tag{33}$$

Dans notre cas  $\theta=20^\circ$  et on a déterminé précédemment  $E_{seuil} = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ lux}$ .

Nous pouvons tracer l'évolution de  $d$  en fonction de  $I_{eb}$ .



**Fig.IV.2.5- Distance  $d$  en mètres minimale entre un observateur d'une étoile de magnitude 6 à 20° au-dessus de l'horizon en fonction de l'intensité de la source éblouissante maximale en candéla afin que cette source ne le gêne pas pour observer cette étoile.**

On peut également utiliser cette courbe dans le cas où nous avons non pas une mais 10 ou 100 ou encore  $N$  sources éblouissantes comme dans le cas d'une série de  $N$  lampadaires visibles à l'horizon.

### 3-Spécifications sur l'éblouissement perturbateur sur un site astronomique

#### Cas d'une seule source éblouissante visible à l'horizon

Nous pouvons déduire des calculs de la partie IV.2 et de la Fig.IV.2.5 les spécifications de distance à partir de laquelle une source d'intensité  $I_{eb}$  en candéla n'est plus une gêne en ce qui concerne l'éblouissement pour l'observation d'une étoile de magnitude 6 à 20° au-dessus de l'horizon.

Intensité $I_{eb}$ de la source en direction de l'observateur	$I < 100$ cd	$100 \text{ cd} < I < 1000$ cd	$1000 \text{ cd} < I < 10000$ cd	$10000 \text{ cd} < I < 100000$ cd
Distance minimale garantissant la non-gêne pendant l'observation d'une étoile de magnitude 6 à 20° au-dessus de l'horizon	200 m	800 m	2.5 km	8 km

#### Cas de plusieurs sources éblouissantes visibles à l'horizon

Dans le cas où N sources éblouissantes sont visibles à l'horizon, se trouvant toutes dans le même ordre de grandeur de distance  $d$  du site et sont superposées dans le champ de vision ; l'intensité maximale tolérable pour chacune d'entre elles est  $I_{eb}/N$ , où  $I_{eb}$  est l'intensité maximale tolérée à la distance  $d$  pour une seule source.

Dans le cas où N sources éblouissantes sont visibles à l'horizon et ne se trouvent pas à la même distance  $d$  du site, on note:

- $N_k$  le nombre de sources éblouissantes se trouvant à la distance  $d_k$  du site,
- $I_k$  l'intensité maximale tolérable pour les sources se trouvant  $d_k$ ,
- Les distances  $d_k$  sont rangées par ordre croissant.

Le seuil d'éclairement éblouissant  $E_{eb}$  dans le plan de l'œil est égal à la somme des éclairagements  $E_k$  de chacune des N sources visibles à l'horizon.

$$E_{eb} = \sum_k N_k E_k = \sum_k N_k \frac{I_k \cos(20)}{d_k^2} \tag{34}$$

Or : 
$$E_{eb} = \frac{I_{eb} \cos(20)}{d_{min}^2} \Rightarrow I_{eb} = N_1 I_1 + \sum_{k \neq 1} \frac{N_k d_1^2}{d_k^2} I_k \tag{35}$$

Les N sources éblouissantes doivent donc vérifier l'inégalité (36) où  $I_{eb}$  serait l'intensité maximale tolérable pour une seule source visible à l'horizon à la distance  $d_1$ .

$$N_1 I_1 + \sum_{k \neq 1} \frac{N_k d_1^2}{d_k^2} I_k \leq I_{eb} \tag{36}$$

## VII- Annexes

### 1- Mise à jour de la spécification AFA

#### Spécification du non-éblouissement en milieu urbain

**E6** : Les sources lumineuses ne doivent pas être éblouissantes i.e. elles ne doivent pas susciter une augmentation du seuil de perception supérieure à 10%. Pour cela, les sources lumineuses ne doivent pas dispenser un éclairage supérieur à 3 lux dans le plan orthogonal à la ligne de visée d'un observateur, situé au niveau de l'œil et ce lorsque l'observateur regarde à l'horizon.

Les sources lumineuses doivent être bafflées, le flux total émis doit être inférieur à 12000 lm et leur mât doit être d'au moins de 12 mètres de hauteur pour respecter le critère  $TI \leq 10\%$  dans un périmètre de 15 mètres à partir du pied, ou d'au moins 9 mètres de hauteur pour respecter le critère  $TI \leq 10\%$  dans un périmètre de 10 mètres.

On pourra se référer à la Fig.2.5.6 pour les sources de flux total émis supérieur à 12000 lm

#### Spécification du non-éblouissement sur un site astronomique

Pour observer une étoile de magnitude 6 à 20° au dessus-de l'horizon sans être gêné par des sources éblouissantes visibles à l'horizon :

- Dans le cas d'une seule source visible à l'horizon à une distance  $d$ , on se reportera au tableau p.33 pour trouver l'intensité maximale tolérable à cette distance  $I_{éb}$ .
- Dans le cas de  $N$  sources visibles à l'horizon (et semblant alignées), se trouvant dans le même ordre de grandeur de distance  $d$  du site, l'intensité maximale tolérable pour chacune de ces sources vaut  $I_{éb}/N$ .
- Dans le cas de sources multiples se trouvant à différentes distances du site on se reportera au dernier paragraphe de la partie IV.3.

### 2-Procédure de Validation

#### Spécification du non-éblouissement en milieu urbain

En milieu urbain pour s'assurer du respect de la spécification de non-éblouissement, on se munira d'un luminancemètre et on mesurera la luminance de la source de surface apparente  $S$ , on déduira alors l'éclairage dans le plan de l'œil à l'aide des relations de radiométrie entre l'éclairage, la luminance et l'angle solide. Et on pourra dresser la carte d'éclairage de l'œil en plusieurs points autour du lampadaire et ce en regardant à l'horizon.

On pourra notamment relever l'éclairage aux distances comprises entre 0 et 20 mètres du lampadaire par pas de 5 mètres. Ces mesures effectuées sur une même droite depuis le pied du lampadaire seront renouvelés si l'éclairage n'est pas uniforme autour du lampadaire, et ce par pas de 45° autour du lampadaire.

L'éclairage dans le plan de l'œil ne doit pas excéder 3 lux.

Plus simplement, on pourra se munir des données constructeurs du lampadaire et selon le flux total émis, vérifier la hauteur du mât du lampadaire, qui doit être de plus de 12 mètres pour un flux total émis compris entre 3000 et 12000 lm. Pour les flux totaux émis supérieurs à 12000 lm on se réfère à la Fig.III.2.6 quant à la hauteur du mât requise.

#### Spécification du non-éblouissement sur un site astronomique

Depuis un site astronomique, on repérera toutes les sources lumineuses présentes dans le champ de vision. Ensuite muni d'une carte des environs, on regardera à quelle distance se situent ces sources du site astronomique.

On pourra alors se rendre près de la source, et mesurer la luminance  $L$  à l'aide d'un luminancemètre de la surface apparente du luminaire dans la direction du site astronomique. On utilisera alors les relations de photométrie vues en partie IV pour en déduire l'intensité lumineuse dans la direction du site astronomique.

On vérifiera alors que ces sources respectent la spécification selon la distance à laquelle elles se trouvent du site astronomique.

### Graphiques additionnels

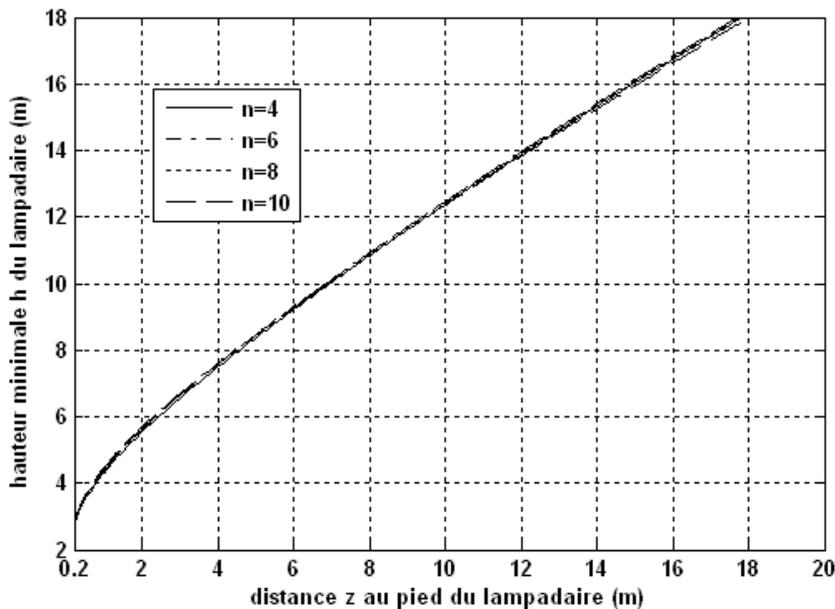


Fig.VII.1-Hauteur minimale du lampadaire garantissant un  $Tl \leq 10\%$  en fonction de la distance au pied du lampadaire. On a pris un lampadaire bafflé ( $n=4,6,8,10$ ) et de flux total émis 30000 lm.

## VIII- Conclusion

Cette étude bibliographique a donné lieu à une recherche des lois modélisant l'éblouissement de l'œil humain. On a alors étudié les paramètres pertinents de quantification de l'éblouissement puis modélisé l'éblouissement de l'œil en milieu urbain et sur un site astronomique.

On remarquera que les résultats de la partie sur l'éblouissement de l'œil en milieu urbain ne s'appliquent qu'à une situation où le piéton est en présence d'un seul luminaire, il serait intéressant de compléter ces résultats par une étude en présence de plusieurs luminaires. Les résultats obtenus pourront permettre, après une étape de validation sur le terrain, de compléter les spécifications sur la protection du ciel nocturne de l'AFA.

Enfin, nous ne pouvons que souhaiter que ce document contribuera à sensibiliser les élus et les éclairagistes sur l'importance du fait qu'il n'est pas nécessaire de sur-éclairer la partie de la chaussée réservée aux piétons.

Par ailleurs, Opto Services se propose pour réaliser l'étude pratique découlant de cette étude bibliographique. A savoir, la réalisation d'une étude pratique depuis une zone de type C afin de vérifier les résultats théoriques de cette étude.

## IX- Références Bibliographiques

1. Stéphane Géronimi, *Modélisation de l'œil humain : contribution à l'étude de l'éblouissement*, Orsay, Université Paris XI Orsay (thèse de doctorat en Sciences Physiques), 1997.
2. Colour and Vision Research Laboratory
3. Hervé Sauer, *Cours de colorimétrie*, Institut d'Optique, 2007.
4. Spécifications AFA
5. Vos J.J. and van den Berg T.J.T.P, *Report on disability glare*, CIE 135/1-1999, Collection on Vision and Colour.
6. Gibbon R.B, *Glare modeling formulae*, Virginia Tech Transportation Institute
7. Norme prEN 13201-3
8. Buser P., Imbert M., *Neurophysiologie fonctionnelle*, tome IV:Vision, 1987
9. Rapport Opto Services pour l'étude référencée 09 371 AFA, *Expertise de l'éclairage de la commune de Mortagne-au-Perche*, Novembre 2009
10. Cinzano P., *Measuring and modeling light pollution*, 1999
11. Lionel Jacobowicz, *Cours d'optique physiologique*, Institut d'Optique
12. Van Derlofske J., *Glare basics*, Lighting Research Center Rensselaer Polytechnic Institute
13. Eclairage public-Partie 2 : exigence de performance, prEN 13201-2
14. C. Remande, *Guide d'application de la norme européenne-Eclairage public EN 13201*, Lux n°244, septembre-octobre 2007.
15. Rapport Opto Services pour l'Association Française d'Astronomie, *Etude scientifique de la pollution lumineuse*
16. J.-L. Meyzonette, *Cours de radiométrie: première partie*, Institut d'Optique
17. P. Denieul, H. Brettel, A. Monot et F. Vienot, *Vision et visualization*, CNRS UPR 257, Laboratoire de Physique Appliqué du Museum.
18. AFE, *les nuisances dues à la lumière*, 2006

## Notations et Acronymes

$Tl$  : threshold increment ou augmentation relative du seuil de perception, traduit l'augmentation relative du seuil de luminance perceptible par un observateur sur une luminance de fond donnée.

*AFA* : Association Française d'Astronomie.

*CIE* : Commission Internationale de l'Eclairage.

$td$  : troland, éclairement rétinien d'une surface de luminance de  $1 \text{ cd.m}^{-2}$  vue à travers une pupille de  $1 \text{ mm}^2$ .

$n$  : coefficient du cosinus dans la modélisation en  $\cos(\varphi/2)$ ,  $n=0$  correspond à un lampadaire non bafflé de type boule,  $n=4$  a un lampadaire d'ULOR égal à 12.5%.

$C$  : contraste de Weber-Fechner ou contraste psychophysique.

$L_{\text{objet}}$  : luminance de l'objet observé ( $\text{cd.m}^{-2}$ ).

$L_{\text{fond}}=L_{\text{moy}}$  : luminance moyenne du fond sur lequel on observe l'objet ( $\text{cd.m}^{-2}$ ).

$L_{\text{voile}}$  : luminance de voile équivalente ( $\text{cd.m}^{-2}$ ), traduit la luminance due à un éblouissement perturbateur venant se superposer aux luminances de la scène observée.

$E_{\text{ébloui}}=E_{\text{seuil}}$  : seuil d'éclairement éblouissant dans le plan de l'œil (lux).

$E_{\text{sol}}$  : éclairement du sol (lux).

$\rho$  : albédo de la surface éclairée.

$F_{\text{tot}}$  : flux total émis par un luminaire (lm).

$d=z$  : distance au pied du luminaire ou à la source lumineuse (m).

$I_0$  : intensité nominale émise au nadir par un lampadaire (cd).

$I(\varphi)$  : intensité émise dans la direction faisant un angle  $\varphi$  avec le nadir (cd).

$\varphi$  : angle d'arc mesuré par rapport au nadir.