



HAL
open science

Simulation, évaluation et optimisation de la lisibilité nocturne des aménagements urbains : prise en compte des propriétés de réflexion de la lumière par les revêtements pour un éclairage adapté aux différents usagers de l'espace public

Laure Lebouc

► **To cite this version:**

Laure Lebouc. Simulation, évaluation et optimisation de la lisibilité nocturne des aménagements urbains : prise en compte des propriétés de réflexion de la lumière par les revêtements pour un éclairage adapté aux différents usagers de l'espace public. Autre. Université d'Angers, 2023. Français. NNT : 2023ANGE0078 . tel-04598094

HAL Id: tel-04598094

<https://theses.hal.science/tel-04598094>

Submitted on 3 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITÉ D'ANGERS

ÉCOLE DOCTORALE N° 641
*Mathématiques et Sciences et Technologies du
numérique de l'Information et de la Communication*
Spécialité : *Signal, Image, Vision*

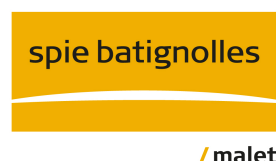
Par

Laure LÉBOUC

**Simulation, évaluation et optimisation de la lisibilité nocturne des
aménagements urbains : prise en compte des propriétés de
réflexion de la lumière par les revêtements pour un éclairage
adapté aux différents usagers de l'espace public.**

Thèse présentée et soutenue à l'Université d'Angers, le 03/10/2023

Unités de recherche : Laboratoire Angevin de Recherche en Ingénierie des Systèmes (Université
d'Angers), Équipe de recherche Éclairage et Lumière (Cerema, Agence d'Angers)



Composition du Jury :

Rapporteuse :	Indira THOUVENIN	Professeur - Université de Technologie de Compiègne
Rapporteur :	Dominique DUMORTIER	Professeur - ENTPE
Examinatrice :	Céline VILLA	Ingénieure chercheuse - Université Gustave Eiffel
Examinateur :	Roland BRÉMOND	Directeur de recherche - Université Gustave Eiffel
Examinateur :	Daniel MENEVEAUX	Professeur - Université de Poitiers
Dir. de thèse :	Paul RICHARD	Maître de conférences - Université d'Angers
Co-encadrant :	Vincent BOUCHER	Chargé de recherche - Cerema
Co-encadrant :	Florian GREFFIER	Ingénieur chercheur - Cerema

Invitée :

Encadrante industrielle : Aurélia NICOLAÏ

Responsable projets R&D - Spie batignolles malet

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Mme Indira Thouvenin et M. Dominique Dumortier d'avoir accepté de rapporter mes travaux de thèse, ainsi que Mme Céline Villa et MM. Daniel Meneveaux et Roland Brémond d'avoir assumé le rôle d'examineurs.

J'adresse plus particulièrement mes remerciements à mon directeur de thèse, M. Paul Richard, à mes co-encadrants, MM. Vincent Boucher et Florian Greffier, et à mon encadrante industrielle, Mme Aurélia Nicolai, pour leur implication pendant ces trois années. Vous avez su répondre à mes sollicitations et m'orienter pour mener à bien mes travaux de recherches et pour cela, je vous dis merci.

Je remercie l'entreprise Spie batignolles malet pour avoir permis le montage de ce projet de thèse, et notamment les membres de la Direction Technique pour leur accueil et leur intégration au sein de cette équipe. Ils m'ont apporté de nombreuses connaissances sur le domaine routier alors que je partais de zéro.

Je tiens également à remercier le Cerema d'Angers pour m'avoir accueilli dans ses locaux, et plus particulièrement l'équipe Éclairage et Lumière (EL). Je remercie l'ensemble de mes collègues et amis du Cerema d'Angers, notamment les agents des équipes EL et Infrastructures Durables avec qui j'ai passé d'agréables moments. Je pense notamment à nos parties de tarot, de foot en salle, à toutes les grilles de mots croisés que j'ai pu remplir avec David Chauvet, aux soirées Koh-Lanta avec Joffrey Girard et Antoine-Victor Chavas que nous débriefions ensuite avec Ludovic Ragueneau, etc. Je les félicite également pour nous avoir supporté, mon micro de karaoké et moi, pendant mes quelques moments de folie, et leur souhaite bon courage pour la suite car ça ne risque pas de s'arrêter de sitôt.

J'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui ont su répondre à mes sollicitations et questionnements ainsi que celles avec qui j'ai pu collaborer : Kai Sorensen et Valérie Muzet sur la photométrie routière, Pierre Yves Donzallaz et Pierre Michel sur le moteur de jeu Unity 3D, Emmanuelle Ménétrier sur le montage d'expérimentations psychophysiques, Steve Lileke pour le développement de méthode d'interpolation

et extrapolation, ainsi que l'équipe STI du Cerema de Clermont-Ferrand et notamment Sébastien Liandrat pour toutes les mesures de tables- r au gonioréfectomètre. Un grand merci à Florian Focone du UserLab d'Angers pour nous avoir aidé dans le montage des expérimentations avec sujet en réalité virtuelle, avec l'aide des étudiants de Polytech'Angers (Coline Olivier, Malo Doret, Arthur Bardon, Amélie Bret, Nathan Portier, Kévin Rolland).

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes amis pour leur soutien durant ces trois années, malgré qu'ils aient toujours eu du mal à comprendre pourquoi je faisais une thèse.

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	15
2	État de l'art	19
2.1	Système visuel humain	19
2.1.1	Repères physiologiques	19
2.1.2	Grandeurs photométriques	23
2.1.3	Colorimétrie	28
2.2	Éclairage routier et visibilité	35
2.2.1	Visibilité routière	35
2.2.2	Recommandations actuelles	50
2.3	La réalité virtuelle	54
2.3.1	Pour simuler des phénomènes physiques	55
2.3.2	Pour des expérimentations avec sujets	59
2.4	Problématique	62
3	Impact du revêtement en éclairage routier	65
3.1	Développement d'un logiciel d'éclairage	66
3.1.1	Description du logiciel	66
3.1.2	Validation du logiciel	68
3.2	Intégration des propriétés optiques des revêtements	72
3.2.1	Options ajoutées au logiciel	72
3.2.2	Contribution du revêtement aux performances d'une installation d'éclairage	72
3.3	Ajout d'un critère de visibilité	78
3.3.1	Le modèle de niveau de visibilité d'Adrian	78
3.3.2	Mise en œuvre du calcul du niveau de visibilité d'Adrian	82
3.3.2.1	Ombre	82
3.3.2.2	Luminance de fond	84
3.3.2.3	Luminance d'adaptation	87

3.3.2.4	Taille angulaire	88
3.3.2.5	Simulation du <i>VL</i> sur le site Lumiroute®	88
3.3.3	Ajout des réflexions de la lumière sur la surface de la route	89
3.3.3.1	Calcul de l'éclairement réfléchi arrivant sur la cible	90
3.3.3.2	Zone d'intégration et nombre de surfaces élémentaires	91
3.3.3.3	Interpolation et extrapolation des tables- <i>r</i>	93
3.3.3.4	Simulation du <i>VL</i> complet sur le site Lumiroute®	99
3.4	Mesures sur le site expérimental Lumiroute®	101
3.4.1	Mesures expérimentales	102
3.4.1.1	Mesures traditionnelles	102
3.4.1.2	Mesures de visibilité	103
3.5	Estimation de la visibilité pour un second site expérimental	108
4	Évolution de la géométrie d'observation en éclairage urbain	113
4.1	Où regardent les usagers lors de leurs déplacements nocturnes?	114
4.1.1	Première étude en environnement virtuel	114
4.1.2	Seconde expérimentation	118
4.1.2.1	Méthodologie	118
4.1.2.2	Résultats	122
4.1.2.3	Discussion des résultats	124
4.1.3	Impact sur les calculs d'éclairage	126
4.2	Nouvelles géométries d'observation	128
4.2.1	Simulation pour de nouveaux angles d'observation	128
4.2.2	Mesures sur site avec les nouveaux angles	130
4.2.3	Confrontation entre simulation et mesure	131
4.3	Adaptation des recommandations	132
5	Travaux exploratoires	143
5.1	Colorimétrie	144
5.1.1	Évolution de la couleur des revêtements	144
5.1.1.1	Méthodologie	145
5.1.1.2	Panel de revêtements	146
5.1.1.3	Résultats et discussion	147
5.1.2	Lien possible entre L^* et albédo	153
5.2	Simulation dans Unity 3D	156

5.2.1	Simulation de l'éclairage	156
5.2.2	Simulation des propriétés optiques du revêtement	161
6	Conclusion	165
	Bibliographie	171
A	Annexes	189
A.1	Résultats de mesures et de simulations sur le site expérimental Lumiroute®	189
A.2	Résultats de mesures et de simulations sur le second site expérimental . . .	217
A.3	Consignes pour l'expérimentation avec sujets	240
A.4	Mesures colorimétriques de revêtements	241

TABLE DES FIGURES

2.1	Schéma de l'œil et comparaison avec une caméra.	20
2.2	Schéma du système visuel humain. (<i>Source</i> : https://tpe-illusionoptique.pagesperso-orange.fr/2a%20Les%20cibles%20du%20nerf%20optique.htm)	20
2.3	Schéma structurel de la rétine. (<i>Source</i> : <i>Par Pancrat — Travail personnel, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17617245</i>)	21
2.4	Distribution des photorécepteurs à bâtonnets et à cônes sur la rétine humaine par rapport à la position de la fovéa (Wandell, 1995).	22
2.5	Courbes de sensibilité spectrale relative des bâtonnets (en noir), des cônes S (en bleu), des cônes M (en vert) et des cônes L (en rouge), pour les observateurs 2° (courbes continues) et 10° (courbes discontinues) définies par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). (<i>Source des données</i> : https://cie.co.at)	22
2.6	Spectre électromagnétique et ses différents domaines. (<i>Source</i> : https://fr.khanacademy.org/s-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum)	23
2.7	Schéma illustrant les différentes grandeurs photométriques (<i>Source</i> : https://leclairage.fr/th-photometrie/).	24
2.8	Courbes d'efficacité lumineuse relative pour les visions photopique et scotopique (<i>Source des données</i> : https://www.cvgl.org).	26
2.9	Fonctions colorimétriques $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$ (CIE, 1932).	29
2.10	Fonctions colorimétriques $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ (CIE, 1932) et $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ (CIE, 1964).	30
2.11	Diagramme de chromaticité associé à l'espace CIE XYZ 1931. En bleu, les longueurs d'onde des rayonnements monochromatiques du visible.	31
2.12	Représentation graphique de l'espace CIE L*a*b* 1976. (<i>Source</i> : https://www.linshangtech.com/space-tech1439.html#fancybox-1)	32
2.13	Géométrie de mesure du coefficient de luminance (<i>Source</i> : <i>Coulomb & Brusque (1996)</i>)	42

2.14	Grille normalisée pour le calcul ou la mesure des critères de performances d'une installation d'éclairage, selon la norme européenne (CEN, 2015c,d).	52
3.1	Interface d'accueil du logiciel ESPRIE.	66
3.2	Axes de rotation du luminaire par rapport au système de coordonnées (x,y,z) (<i>Source : Norme EN 13201-3 :2015 (CEN, 2015c)</i>).	68
3.3	Panel « Chaussée » du logiciel ESPRIE. À gauche est illustrée la possibilité de normaliser la table- r standard choisie à l'aide de Q_0 . À droite, choix possible de table- r réelle.	73
3.4	Schéma du site expérimental Lumiroute® à Limoges (France) avec une photographie de chaque revêtement juste après la mise en œuvre.	74
3.5	Solides photométriques des revêtements du site expérimental Lumiroute®.	75
3.6	À gauche : Photo montrant l'ombre de la cible provoquée par les luminaires. À droite : Schéma de l'ombre de la cible provoquée par un luminaire.	83
3.7	Positionnement de l'ellipse aux quatre positions à comparer pour la luminance de fond (croix vertes). Les croix bleues correspondent aux milieux des côtés de la cible, les croix rouges à leurs projections sur le sol et les croix vertes correspondent aux centres des ellipses de 2 min d'arc qui sont tangentes aux croix rouges.	84
3.8	Schéma de définition de l'ellipse de 2 min d'arc permettant le calcul de la luminance de fond.	85
3.9	A gauche : Sources de la luminance de la cible. A droite : Géométrie pour le calcul de l'éclairement cible indirect (<i>Source : Manuscrit de thèse de Gibbons (1998)</i>).	90
3.10	Contribution normalisée de la surface du sol à l'éclairement réfléchi de la cible pour différentes tailles de zone d'intégration. La cible est située à droite.	91
3.11	Évolution de l'éclairement réfléchi total arrivant sur la cible en fonction du nombre de surfaces élémentaires considérées.	92
3.12	Distribution des angles α entre la cible et les portions de route de la zone d'intégration.	93
3.13	Évolution de la clarté Q_0 de chaque section du site Lumiroute® en fonction de l'angle d'observation α . Les points 'o' correspondent aux Q_0 obtenus avec les six tables- r et les lignes représentent l'ajustement pour chaque section de route.	95

3.14	Diagramme représentant l'importance de chaque variable dans la valeur du coefficient de luminance q	97
3.15	Valeurs de $NMRSD$ en fonction de l'angle d'observation α pour les deux méthodes de reconstruction de tables- r	98
3.16	Pour chaque section du site expérimental Lumiroute®, écarts relatifs entre les luminances de cibles dont le calcul prend en compte les réflexions de la lumière sur la surface de la route et celles où elles ne le sont pas.	101
3.17	Élimination des réflexions lumineuses sur la surface de la route en plaçant un tissu noir de 1 m ² au pied de la cible.	104
3.18	À gauche : Image capturée du point de vue de l'observateur en voie lente sur la section 2 avec la cible positionnée en un point de la grille de mesure. À droite : Nous délimitons la zone correspondant à la cible (en vert) et les zones utilisées pour la luminance de fond dans le calcul du VL (en rouge).	104
3.19	Écarts relatifs entre les luminances de cible obtenues en posant le drap noir au sol et sans, pour les configurations 2b (à gauche) et 4 (à droite).	105
3.20	Changement de visibilité de la cible pour chaque position après prise en compte des réflexions lumineuses sur la surface de la route pour la section 2b (à gauche) et la section 4 (à droite).	106
3.21	Visibilité de la cible pour chaque position après prise en compte des réflexions lumineuses sur la surface de la route pour la section 2b (à gauche) et la section 4 (à droite).	107
3.22	Visibilité de la cible pour chaque position après prise en compte des réflexions lumineuses sur la surface de la route pour la section 2a.	108
3.23	À gauche : Image de la surface du revêtement composé avec de la porcelaine broyée. À droite : Solide photométrique de ce même revêtement pour $\alpha = 1^\circ$ ($Q_0 = 0,110$ et $S_1 = 0,32$).	109
3.24	Visibilité de la cible pour chaque position avant et après prise en compte des réflexions lumineuses sur la surface de la route par la mesure (à gauche) et par la simulation (à droite).	110
4.1	A gauche : quartier de ville simulé sous Unity 3D pour l'étude préliminaire (vue du dessus). À droite : Configuration de la première expérimentation avec sujets.	115
4.2	Angles moyens et intervalles de confiance à 95 % obtenus par chaque participant dans chacune des conditions de l'expérimentation préliminaire.	117

TABLE DES FIGURES

4.3	Angles moyens et intervalles de confiance à 95 % obtenus par chaque participant dans chacune des conditions de l'expérimentation préliminaire en ne prenant en compte que les données recueillies le long de la ligne droite de 300 m.	117
4.4	Configuration de la seconde expérimentation avec sujets.	119
4.5	À gauche, vue de haut sous Unity 3D de l'environnement virtuel (ville et portion de rocade en fond). À droite, exemples de visuel d'une rue de la ville en bas et d'une portion de rocade en haut.	120
4.6	Image de la demi-sphère rouge qui apparaît aléatoirement pour assurer une double tâche simultanée.	121
4.7	Diagramme boîte à moustaches de la répartition des angles d'observation pour chaque modalité de déplacement.	124
4.8	Densités de probabilité des angles d'observation α pour chacun des quatre modes de déplacement.	125
4.9	Observateur fixe <i>vs.</i> observateur mobile d'après Greffier (2022).	128
4.10	Solides photométriques du revêtement du second site expérimental pour $\alpha = 1^\circ, 3^\circ$ et 5°	130
5.1	À gauche : Chromamètre CR-410 (Konica-Minolta). À droite : Spectrophotomètre CM-2300d (Konica-Minolta).	145
5.2	Répartition des zones de mesure avec les chromamètres à gauche, et avec le spectrophotomètre à droite.	146
5.3	Illustration de la diversité de couleurs possible des chaussées. Sur la première ligne, quatre exemples de bétons bitumineux. En dessous, quatre exemples de pavés préfabriqués en béton de ciment.	148
5.4	Densité de probabilité des différences de couleur calculées.	149
5.5	Représentation des coordonnées colorimétriques par famille de revêtements.	150
5.6	Exemple d'albédomètre de la marque BLET (<i>Source : https://www.blet-climat.fr/bilan-radiatif/albedometre-cma-6.html</i>)	154
5.7	Schéma de mesure d'un pseudo-albédo de revêtement de chaussée.	155
5.8	Pseudo-albédo de revêtements routiers en fonction de la valeur du L^* mesuré dans le référentiel CIELAB.	155
5.9	Capture d'écran de la scène simulée pour évaluer le comportement de la lumière sous Unity 3D.	157

5.10	Distributions de l'éclairage généré par une source ponctuelle sous Unity 3D, par la théorie, et la différence entre les deux.	158
5.11	Éclairage en fonction du niveau de gris sous Unity 3D pour un ensemble de paramètres donné.	158
5.12	Distributions de l'éclairage généré par une source ponctuelle sous Unity 3D en modifiant seulement le paramètre EV.	159
5.13	Distribution de l'éclairage généré par le luminaire Oxane selon la fiche technique fournie par le fabricant.	159
5.14	Distributions de l'éclairage généré par le luminaire Oxane sous Unity 3D, par la théorie, et la différence entre les deux.	160
5.15	Captures d'écran des scènes Unity 3D générées lorsqu'on applique au luminaire un fichier IES contenant des coefficients qui sont tous égaux à 0,30 pour l'image de gauche et égaux à 640 pour l'image de droite.	161
5.16	Scène Unity 3D reproduisant un gonioréfectomètre.	162
5.17	Solides photométriques représentant une partie des tables- <i>r</i> obtenues avec Unity 3D en faisant varier les valeurs des paramètres <i>Metalness</i> et <i>Roughness</i> (respectivement M et R) du revêtement.	163
6.1	Images en couleur et en luminance de deux objets de couleurs différentes. .	169

INTRODUCTION

« Abolir la nuit. »

C'est là le titre d'un des épisodes de la série documentaire *Faire l'histoire* de la chaîne Arte (Boucheron & Reculin, 2022). C'est aussi et surtout le rôle de l'éclairage.

En 1667 pour Paris puis en 1697 pour la France entière, Louis XIV impose l'installation de lanternes pour éclairer les rues. Celles-ci sont constituées d'une mèche charbonnée qu'il faut couper toutes les heures. Des personnes sont employées pour le faire ce qui coûte cher et entraîne donc de nouveaux impôts. En 1744, un ingénieur français, Dominique-François Bourgeois, met au point la lanterne à réverbère. Cette dernière est composée d'une mèche de coton encirée, plongée dans de l'huile de tripes que l'on fait brûler, et d'un réflecteur argenté, permettant un éclairage en direction du sol sur une longue durée. Cependant, on note de nombreux problèmes : des accidents dus aux écoulements d'huile brûlante, un mécontentement des usagers à cause de l'odeur peu agréable et la vulnérabilité des lanternes à une extinction lors d'un coup de vent. C'est pourquoi, à partir de 1829, les lanternes à huile commencent à être remplacées par des lanternes au gaz. On signale tout de même les premiers impacts sur la biodiversité : on observe des nuages de papillons autour des lanternes et ceux-ci pondent de nombreux oeufs sur les fûts. Durant la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, de nombreuses innovations se succèdent jusqu'à l'arrivée de la lampe à incandescence en 1879. C'est notamment à partir du début du XX^{ème} siècle, grâce aux travaux de Thomas Edison, que l'éclairage électrique commence à rivaliser avec l'éclairage au gaz. On voit ensuite apparaître les premières lampes à décharges dans les années 1930, puis les ballons fluorescents et les lampes à sodium haute pression qui équipent la plupart des villes à partir des années 1950, et enfin, dans les années 1990 a lieu la généralisation des lampes à iodures métalliques en éclairage public ¹.

1. Les dates clés de ce paragraphe sont issues du récit de l'*Histoire de l'éclairage public en France* disponible sur le site web http://phozagora.free.fr/?page=zoom_histoire

Plus de 300 ans après la naissance de l'éclairage public, malgré les avancées technologiques et le renouvellement des installations, la réduction des dépenses énergétiques associées à l'éclairage public est toujours au cœur des discussions. Elle l'est d'autant plus aujourd'hui puisqu'elle est un moyen d'action important pour l'adaptation des territoires urbains au changement climatique. En France par exemple, l'éclairage public représente 41 % de la facture d'électricité des collectivités (AFE, 2019). Pour optimiser les émissions de lumière artificielle nocturnes, trois leviers peuvent être considérés. Le premier concerne les sources d'éclairage en remplaçant progressivement les sources énergivores par des technologies à LED. Cela permet de réduire la puissance lumineuse installée tout en offrant une durée de vie des lampes plus importante (Huteau, 2018).

Le second se rapporte au revêtement routier puisque c'est un élément déterminant de la qualité des espaces publics, pour lequel les choix techniques et financiers influent sur la qualité d'usage, la sécurité, l'esthétique, l'environnement et la pérennité (Cerema, 2018). En effet, optimiser leur capacité à réfléchir la lumière peut participer à une meilleure lisibilité, permettre de réduire la dépense énergétique liée à l'éclairage public ou bien traiter la problématique des îlots de chaleur urbain. Actionner ce levier réside donc dans une meilleure prise en compte des propriétés optiques des surfaces routières pour concevoir les installations d'éclairage (Muzet et al., 2022). Cela permet d'améliorer la luminance de la route qui est la grandeur dimensionnante en éclairage public (CEN, 2015b; CIE, 2010a) puisque c'est elle qui conditionne les performances du système visuel humain.

Le troisième levier concerne justement les usagers et leurs spécificités d'observation qui varient en fonction de leur mode de déplacement : piétons, cyclistes ou automobilistes (Fotios & Gibbons, 2018). En effet, la géométrie normalisée en éclairage public pour dimensionner une installation (CEN, 2015c) ou vérifier ses performances (CEN, 2015d) correspond à un automobiliste se déplaçant sur une route interurbaine à une vitesse comprise entre 70 et 90 km/h (Muzet et al., 2020). Cependant, la plupart de l'éclairage public se trouve aujourd'hui en ville, là où l'on roule généralement entre 30 et 50 km/h. De plus, l'éclairage urbain se doit de répondre aux besoins visuels de tous les usagers de l'espace public afin de leur assurer « une sécurité et un confort aussi élevés que possible » (CIE, 1965a). Cela ne concerne donc pas seulement les automobilistes mais aussi les cyclistes et les piétons. Dès lors, pour identifier les besoins de lumière sur les surfaces routières, il est essentiel de savoir sous quel angle les usagers regardent la route afin de leur offrir la juste

quantité de lumière, celle nécessaire à la sécurisation de leurs déplacements.

Les deux derniers leviers sont au cœur des travaux menés dans le cadre de cette thèse. Notre objectif est de développer une nouvelle méthodologie de dimensionnement et d'évaluation d'aménagement urbain nocturne sous éclairage public, intégrant les propriétés réelles de réflexion des revêtements. Aussi, cette méthodologie doit inclure la possibilité de tenir compte de la multiplicité des usages en faisant varier l'angle d'observation et en offrant ainsi un environnement nocturne mieux adapté aux besoins visuels et aux enjeux sociétaux de transition écologique. Avant de présenter les travaux menés à cette fin, il convient de les positionner vis à vis de l'état de l'art. Le prochain chapitre nous permettra également de définir les notions utiles pour la suite.

ÉTAT DE L'ART

2.1 Système visuel humain

« Voir c'est explorer du regard son environnement. C'est y reconnaître et y localiser formes, objets inanimés, êtres vivants. C'est aussi pouvoir apprécier leurs déplacements et se mouvoir par rapport à eux. » (Jeannerod, 1977).

Par ces trois phrases, Jeannerod nous illustre le processus psychophysique de la vision dans lequel l'œil, les relais intermédiaires du système nerveux et le cerveau ont un rôle. Pour mieux comprendre le fonctionnement du système visuel humain (SVH), on propose de le décrire succinctement dans cette section.

2.1.1 Repères physiologiques

En tant qu'être humain, nous disposons de deux yeux en position frontale nous offrant un champ de vision binoculaire vertical d'environ 120° et horizontal d'environ 180° , dont 120° couverts simultanément par les deux yeux (Boyce, 2014). Ceux-ci s'apparentent à un appareil photo : ils sont composés de différents éléments agissant comme un système de lentilles associé à un capteur (cf. Figure 2.1). En effet, la lumière pénètre dans l'œil via la cornée qui joue le rôle de l'objectif en assurant plus de $2/3$ de la réfraction des rayons lumineux (Borderie et al., 2005). Elle traverse ensuite la pupille dont le diamètre est contrôlé par l'iris qui va réguler la quantité de lumière entrant dans l'œil. Son diamètre varie de 2 mm lorsque l'environnement est très lumineux à 8 mm lorsque celui-ci est sombre (Boyce, 2014). La lumière est ensuite focalisée sur la rétine par le cristallin qui peut se déformer afin d'assurer une vision nette à toute distance : c'est ce qu'on appelle l'accommodation. L'image de la scène est alors formée à l'envers sur la rétine qui a le rôle du capteur photographique grâce à ses cellules photoréceptrices. L'information est ensuite transmise via les nerfs optiques qui se réunissent au niveau du chiasma optique afin de redistribuer l'information visuelle selon qu'elle est dans la partie droite ou gauche

du champ visuel. L'information provenant de l'hémichamp gauche de chaque œil va dans l'hémisphère droit du cerveau, et vice-versa (voir Figure 2.2). L'image reformée dans le cortex visuel est remise à l'endroit et acheminée jusqu'aux aires du cerveau dédiées au traitement de l'information visuelle.

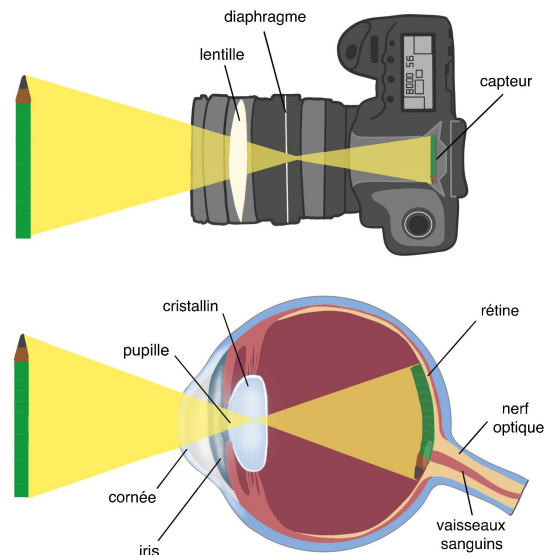


FIGURE 2.1 – Schéma de l'œil et comparaison avec une caméra.

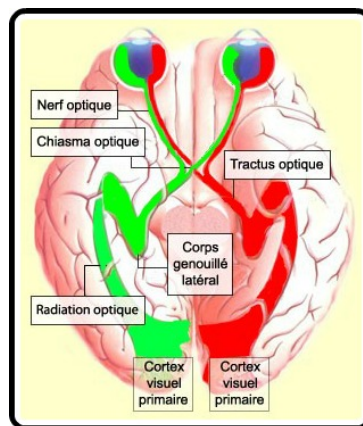


FIGURE 2.2 – Schéma du système visuel humain. (Source : <https://tpe-illusionoptique.pagesperso-orange.fr/2a%20Les%20cibles%20du%20nerf%20optique.htm>)

À cette fin, le signal lumineux a en fait été codé préalablement en signal nerveux par la rétine afin d'être interprétable par le cerveau. La rétine est constituée de plusieurs

couches de cellules empilées comme le montre la Figure 2.3. Chacune des cellules la composant possède des propriétés particulières visant à effectuer un premier traitement de l'information lumineuse. Les photorécepteurs, situés au fond de la rétine (à droite sur la Figure 2.3), captent la lumière et la transforment en influx nerveux transmis aux cellules bipolaires puis aux cellules ganglionnaires. En parallèle, les photorécepteurs envoient également de l'information aux cellules horizontales qui la transmettent à plusieurs cellules bipolaires environnantes. De même, les cellules amacrines transmettent l'information entre les cellules bipolaires et ganglionnaires.

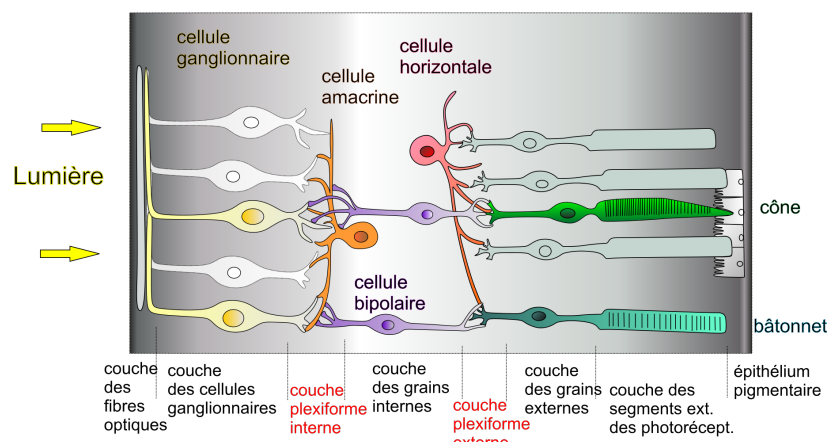


FIGURE 2.3 – Schéma structurel de la rétine. (Source : Par Pancrat — Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17617245>)

Les photorécepteurs sont de deux types : les cônes et les bâtonnets. Chacun a une sensibilité différente à la lumière. Les bâtonnets sont 1000 fois plus sensibles à la lumière que les cônes c'est pourquoi ils sont impliqués dans la vision scotopique, dans des conditions de faible luminosité. Ils permettent de voir en nuances de gris, sans couleur, et sont capables d'envoyer un signal à partir de l'absorption d'un seul photon (Tinsley et al., 2016). Les bâtonnets sont au nombre d'environ 100 millions par œil (Wandell, 1995) et se situent majoritairement en périphérie de la rétine. Leur maximum de sensibilité se situe autour de 507 nm.

De leur côté, les cônes sont majoritairement impliqués dans la vision photopique, pour des scènes de haute intensité lumineuse. Il se situent principalement dans la rétine centrale

appelée macula et sont environ 5 millions (Wandell, 1995). Leur présence dense au centre de la macula, dans la zone appelée fovéa, fait de cette région de la rétine celle offrant la meilleure vision des détails (maximum d’acuité visuelle) (cf. Figure 2.4). Les cônes sont impliqués dans la vision des couleurs et sont de trois types (S, M et L), chacun ayant une sensibilité différente aux longueurs d’onde (Stockman, 2019) (cf. Figure 2.5).

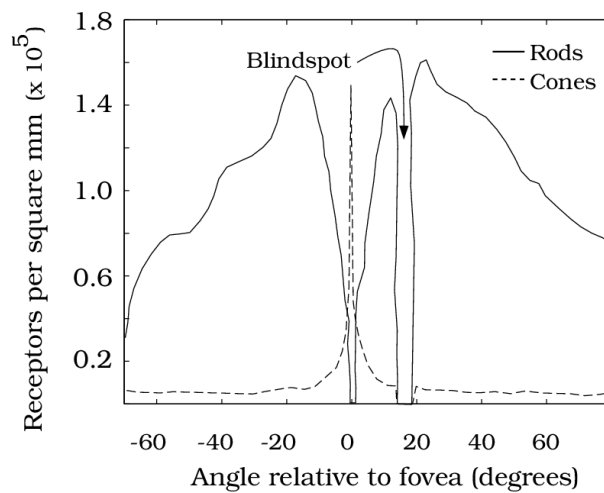


FIGURE 2.4 – Distribution des photorécepteurs à bâtonnets et à cônes sur la rétine humaine par rapport à la position de la fovéa (Wandell, 1995).

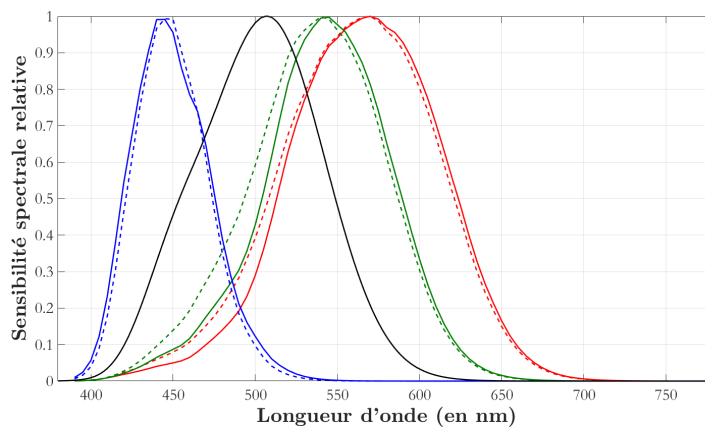


FIGURE 2.5 – Courbes de sensibilité spectrale relative des bâtonnets (en noir), des cônes S (en bleu), des cônes M (en vert) et des cônes L (en rouge), pour les observateurs 2° (courbes continues) et 10° (courbes discontinues) définies par la Commission Internationale de l’Éclairage (CIE). (*Source des données : <https://cie.co.at>*)

2.1.2 Grandeurs photométriques

Une partie de l'énergie solaire arrive sur Terre sous forme de rayonnement électromagnétique allant d'une fréquence de quelques Hz (ondes radios) à plus de $5 \cdot 10^{19}$ Hz (rayons gamma) (cf. Figure 2.6). La radiométrie a pour objet la mesure de l'énergie des rayonnements électromagnétiques. Lorsqu'on s'intéresse seulement au spectre de la lumière visible tel qu'il est perçu en vision humaine, c'est-à-dire pour les longueurs d'onde entre 380 et 780 nm, on parle de photométrie. Pour une meilleure compréhension de la suite de ce manuscrit, nous devons définir quelques grandeurs fondamentales (cf. Figure 2.7).

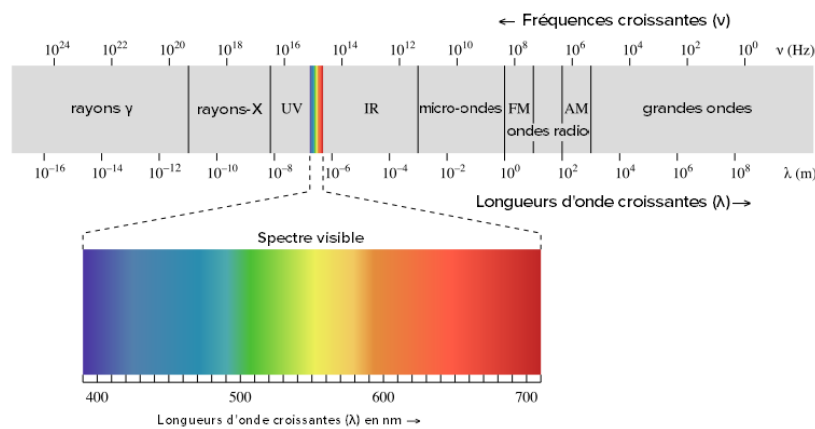


FIGURE 2.6 – Spectre électromagnétique et ses différents domaines. (Source : <https://fr.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>)

Le flux Φ est la puissance totale d'un rayonnement électromagnétique ou autrement dit, le flux correspond à un débit d'énergie Q , c'est-à-dire la quantité d'énergie transportée par unité de temps. Il s'exprime en W ou $J \cdot s^{-1}$ en radiométrie et en lumen (lm) en photométrie.

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2.1)$$

L'intensité I d'une source est la quantité de flux émis par cette source dans une portion de l'espace centrée sur la direction étudiée et limitée par un angle solide $d\omega$. Elle s'exprime en $W \cdot sr^{-1}$ en radiométrie et en candela (cd) en photométrie.

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (2.2)$$

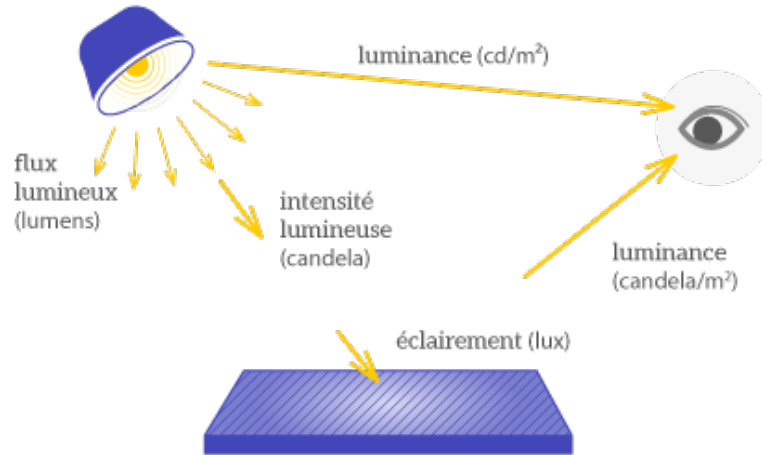


FIGURE 2.7 – Schéma illustrant les différentes grandeurs photométriques (*Source : <https://leclairage.fr/th-photometrie/>*).

L'éclairement E est la quantité du flux incident reçue par une surface dS . Il s'exprime en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ en radiométrie et en lux (lx) en photométrie.

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (2.3)$$

La luminance L est définie comme la densité d'intensité associée à une surface dS dans une direction faisant un angle θ avec la normale à cette surface. Elle s'exprime en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ en radiométrie et en $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ en photométrie.

$$L = \frac{dI}{dS \cos \theta} = \frac{d^2\Phi}{d\omega dS \cos \theta} \quad (2.4)$$

Le passage des grandeurs radiométriques X_e aux grandeurs photométriques X_v se fait à l'aide des fonctions d'efficacité lumineuse spectrale relative de l'œil pour chaque longueur d'onde du spectre visible via l'Équation 2.5 (exemple pour la vision photopique).

$$X_v = K_m \int_{380}^{780} X_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2.5)$$

où $V(\lambda)$ est la fonction d'efficacité lumineuse relative en vision photopique et $K_m = 683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ est la valeur d'efficacité maximale associée (elle dépend du type de vision).

Des courbes d'efficacité lumineuse relative ont été normalisées pour calculer les grandeurs photométriques en vision photopique, scotopique et mésopique, pour les deux types d'observation standards (champ de vision de 2° et de 10°) (ISO/CIE, 2005; CIE, 2019a; BIPM, 2019). Ces trois types de vision se distinguent les uns des autres par la contribution unique ou partagée des cellules photoréceptrices selon la valeur de la luminance d'adaptation de la scène observée.

Lorsque la luminance d'adaptation est supérieure à 5 cd.m^{-2} , c'est-à-dire en condition diurne, on parle de vision photopique (Boyce, 2014; Van Bommel, 2015). Seuls les cônes sont mobilisés pour cette vision. La fonction d'efficacité lumineuse relative associée est notée $V(\lambda)$ et a un maximum d'efficacité à 555 nm (Figure 2.8). Elle est définie pour l'observateur standard 2° et fut proposée par la CIE en 1924 suite aux travaux de Gibson et Tyndall (CIE, 1926; Gibson & Tyndall, 1923). Par la suite, une courbe photopique nommée $V_{10}(\lambda)$ fut introduite pour l'observateur 10° (CIE, 1964). En 1951, Judd propose une rectification de la courbe $V(\lambda)$, afin de corriger la trop faible pondération des courtes longueurs d'onde (Judd, 1951). La fonction de Judd-Vos, qui est présentée sur la Figure 2.8, est également connue sous le nom de fonction de luminosité CIE modifiée $V_M(\lambda)$ et est considérée comme un complément, sans pour autant remplacer $V(\lambda)$ (CIE, 1990; ISO/CIE, 2005).

Lorsque nous sommes en condition nocturne, c'est-à-dire pour des luminances d'adaptation inférieure à $5 \cdot 10^{-3} \text{ cd.m}^{-2}$ (Boyce, 2014; Van Bommel, 2015), nous sommes en vision scotopique. Cette fois, seuls les bâtonnets sont mobilisés. La fonction d'efficacité lumineuse relative associée est notée $V'(\lambda)$ et a un maximum d'efficacité à 507 nm (Figure 2.8). Elle fut proposée en 1951 lors de la 12ème session de la CIE (CIE, 1952). Le décalage que l'on peut observer entre les courbes $V'(\lambda)$ et $V(\lambda)$ est nommé effet Purkinje et traduit le fait que la vision des couleurs dépend de la luminosité.

Entre ces deux visions, c'est-à-dire pour une luminance d'adaptation entre $5 \cdot 10^{-3}$ et 5 cd.m^{-2} , c'est la vision mésopique. Elle correspond à un état intermédiaire pour lequel à la fois les cônes et les bâtonnets sont sollicités dans des proportions dépendant de la luminance d'adaptation. Cette dépendance implique qu'il n'existe pas une unique fonction d'efficacité lumineuse relative mais plutôt une multitude, comprise entre $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$.

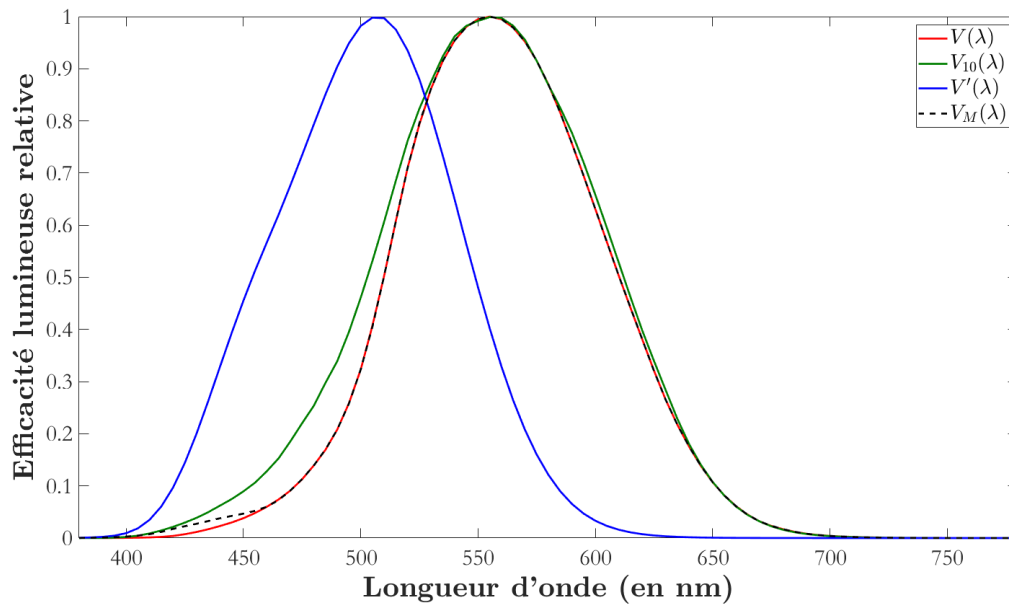


FIGURE 2.8 – Courbes d'efficacité lumineuse relative pour les visions photopique et scotopique (Source des données : <https://www.cvrl.org>).

La vision mésopique fait l'objet de nombreuses réflexions dans le domaine de l'éclairage routier puisque les recommandations de niveaux de luminance moyenne sur la surface de la route sont comprises entre 0,3 et 2 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Dans les années 2000, des études fondamentales sont donc réalisées sur la définition de la vision mésopique (Rea et al., 2004; Goodman et al., 2007). En effet, entre 0,001 et 3 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$, la courbe $V(\lambda)$, représentative du domaine photopique, ne correspond pas exactement à la sensibilité de l'oeil, et plus la luminosité diminue plus l'approximation est mauvaise. Dans une expérimentation, Alferdinck (2006) montre que la photométrie photopique ne rend pas bien compte des performances ni pour la tâche de conduite ni pour la tâche de détection en conduite nocturne. De plus, les appareils de mesure classiques donnent des valeurs photopiques, potentiellement inadaptées, qui sont donc souvent corrigées par un facteur S/P (Scotopique/Photopique). L'idéal serait d'être capable d'estimer la courbe de sensibilité de l'oeil pour différents niveaux lumineux et différentes excentricités.

Pour répondre à cette problématique, Rea et al. (2004) proposent un modèle de photométrie mésopique, le plus simple possible, qui vise seulement à capturer un aspect de la réponse du système visuel à un stimulus et non à la décrire en totalité, puisqu'ils veulent seulement rendre compte de la réponse qui a une utilité pratique pour les besoins des

éclairagistes. Après avoir étudié plusieurs modèles de photométrie mésopique utilisant soit un critère de correspondance de luminance (*brightness matching criterion*) soit une tâche de temps de réaction (*reaction time criterion*), ils choisissent de construire un modèle photométrique additif même s'ils savent que la réponse du système visuel n'est pas additive. Le modèle USP¹ de Rea et al. est de la forme :

$$L_{mes} = xL_p + (1 - x)L_s \quad (2.6)$$

avec L_p la luminance photopique (de jour), L_s la luminance scotopique (de nuit) et L_{mes} la luminance mésopique.

Cependant, déterminer x pose un problème. En effet, x doit être calculé à partir de la luminance d'adaptation qui est elle aussi mésopique et on trouve donc x des deux cotés de l'équation. Pour résoudre ce problème, Rea et al. (2004) introduisent une quantité appelée X remplaçant x et qui vaut 0 en dessous de 10^{-3} cd.m⁻², 1 au-dessus de 0,6 cd.m⁻². Sa valeur entre les deux est formulée en annexe de leur article.

A cette même époque, le projet européen MOVE² voit le jour et cherche à pondérer les courbes $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$. Goodman et al. (2007) font la synthèse des résultats et proposent un modèle de luminance mésopique valable pour des conditions de conduite automobile. L'objectif du modèle présenté est de trouver une courbe qui ne dépende que de la luminance de fond, qui soit égale à $V'(\lambda)$ en scotopique et $V(\lambda)$ en photopique, et qui donne une réponse la plus correcte possible pour des tâches impliquées dans la conduite c'est-à-dire la détection, la discrimination et le temps de réaction. Après avoir essayé plusieurs modèles, le modèle PS (Photopic-Scotopic model of mesopic photometry) est retenu par les auteurs et est de la forme :

$$V_{mes}(\lambda, x) = \frac{1}{M(x)} \left(xV(\lambda) + (1 - x)V'(\lambda) \right) \quad (2.7)$$

avec $M(x)$ une fonction de normalisation. Le problème de la détermination de x est là aussi présent c'est pourquoi des tableaux donnant x et L_{mes} pour différentes L_s et rapports S/P sont donnés. Le système actuel recommandé par la CIE (2010b) (de la même forme que l'Équation 2.7) est un intermédiaire entre le système USP de Rea et al. (2004) et

1. Unified System of Photometry.
2. Mesopic Optimisation of Visual Efficiency.

le système MOVE de Goodman et al. (2007). La luminance mésopique L_{mes} est alors calculée avec la formule 2.8.

$$L_{mes} = \frac{K_m}{V_{mes}(\lambda_0)} \int_{380}^{780} L_e(\lambda) V_{mes}(\lambda) d\lambda \quad (2.8)$$

avec $V_{mes}(\lambda_0)$ la valeur de V_{mes} à 555 nm et $L_e(\lambda)$ la luminance énergétique.

Les valeurs du coefficient x et de la luminance mésopique L_{mes} peuvent être obtenues soit par la résolution d’un système de façon itérative décrite dans le rapport 191 de la CIE (CIE, 2010b) soit en se référant directement à l’annexe 1 de ce rapport qui fournit des tableaux de valeurs en fonction de la luminance photopique et du S/P ratio (rapport de la puissance lumineuse scotopique et photopique).

2.1.3 Colorimétrie

Comme évoqué dans la section précédente, les cônes sont de trois types avec chacun une sensibilité spectrale différente aux longueurs d’ondes. Les cônes S sont plus sensibles à la lumière bleue, les cônes M à la lumière verte et les cônes L à la lumière rouge. De par cette sensibilité, ce sont eux qui permettent la vision des couleurs le jour. La combinaison des stimuli de chacun définit notre perception de la couleur : on parle de trichromatie. Différents modèles colorimétriques permettent de quantifier et de mesurer précisément les couleurs. Nous décrirons ici les principaux référentiels définis par la CIE pour une vision standardisée des couleurs.

En 1855, Maxwell a démontré que toute couleur peut être obtenue par superposition de trois couleurs primaires en quantités adéquates : c’est la synthèse additive (Maxwell, 1855). Sur ce principe, Wright (1929) et Guild & Petavel (1931) ont réalisé une série d’expériences sur la vision humaine, travaux qui furent à la base du premier système international de colorimétrie trichromatique nommé CIE RGB 1931 (CIE, 1932). Dans leurs expériences, Wright et Guild utilisaient un écran circulaire de diamètre angulaire 2° , correspondant à la taille angulaire de la fovéa, qui était séparé en deux parties. La première était éclairée par une source de lumière monochromatique de test, l’autre était éclairée par la superposition de trois sources primaires. L’objectif des sujets était d’ajuster l’intensité de chaque source primaire afin d’obtenir une couleur équivalente visuellement à celle de la source de test. Cependant, il n’était pas toujours possible d’atteindre l’équivalence pour

toutes les couleurs de test. Pour résoudre ce problème, une des sources primaires était retirée de ce côté de l'écran et superposée à la source de test sur l'autre moitié de l'écran. La quantité primaire ajoutée était alors prise en compte comme négative. Ces expériences ont permis de tracer trois courbes, appelées fonctions colorimétriques $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$, représentant la quantité de lumière des trois sources primaires nécessaires pour obtenir par addition une couleur équivalente à celle de la source de test de longueur d'onde λ (cf. Figure 2.9).

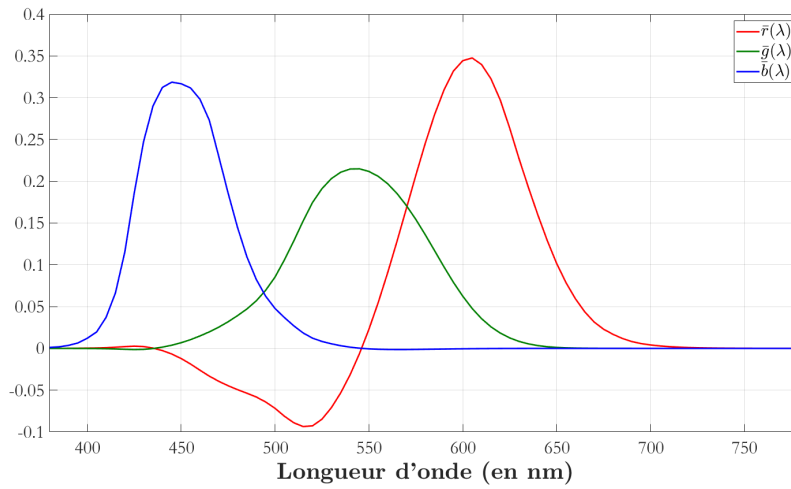


FIGURE 2.9 – Fonctions colorimétriques $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$ (CIE, 1932).

Ces trois fonctions colorimétriques permettent de calculer les composantes trichromatiques R , G et B associées au spectre $S(\lambda)$ d'un stimulus lumineux via les équations du système 2.9.

$$\begin{cases} R = K_m \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \\ G = K_m \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \\ B = K_m \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (2.9)$$

Les coordonnées trichromatiques r , g et b dans le référentiel CIE RGB 1931 sont alors obtenues par le système 2.10. Elles indiquent les proportions de chacune des primaires dans le stimulus.

$$\begin{cases} r = \frac{R}{R+G+B} \\ g = \frac{G}{R+G+B} \\ b = \frac{B}{R+G+B} \end{cases} \quad (2.10)$$

Cependant, les valeurs négatives de certaines composantes des fonctions $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$ empêchent parfois le calcul des coordonnées trichromatiques. Pour s'affranchir de cet inconvénient, la CIE a choisi d'opérer une transformation linéaire de l'espace RGB qui a conduit à des fonctions colorimétriques $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$ n'ayant pas de valeurs négatives (cf. Figure 2.10). Lors de ce changement d'axes, la CIE a également décidé que la fonction $\bar{y}(\lambda)$ devait être la fonction d'efficacité lumineuse $V(\lambda)$. Ce sont ces fonctions qui définissent les fonctions colorimétriques de l'observateur standard 2°. Elles permettent de calculer les composantes X , Y et Z d'un stimulus lumineux ainsi que les coordonnées x , y et z dans l'espace colorimétrique CIE XYZ 1931 via les équations 2.11 et 2.12.

$$\begin{cases} X = K_m \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = K_m \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = K_m \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z = \frac{Z}{X+Y+Z} \end{cases} \quad (2.12)$$

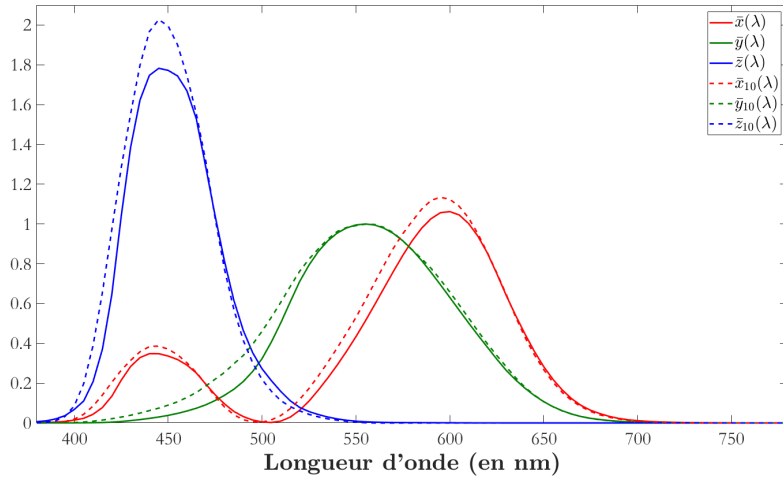


FIGURE 2.10 – Fonctions colorimétriques $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ (CIE, 1932) et $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ (CIE, 1964).

Étant donné que la représentation de la couleur se fait plus aisément dans un plan que dans un espace 3D et comme $x + y + z = 1$, la CIE a défini ce qu'on appelle le diagramme

de chromaticité (cf. Figure 2.11). Il permet de représenter l'ensemble des couleurs visibles dans le plan (x,y) pour une luminance Y constante. Les coordonnées x et y définissent ce qu'on appelle la chrominance et permettent de distinguer des couleurs de luminance égale.

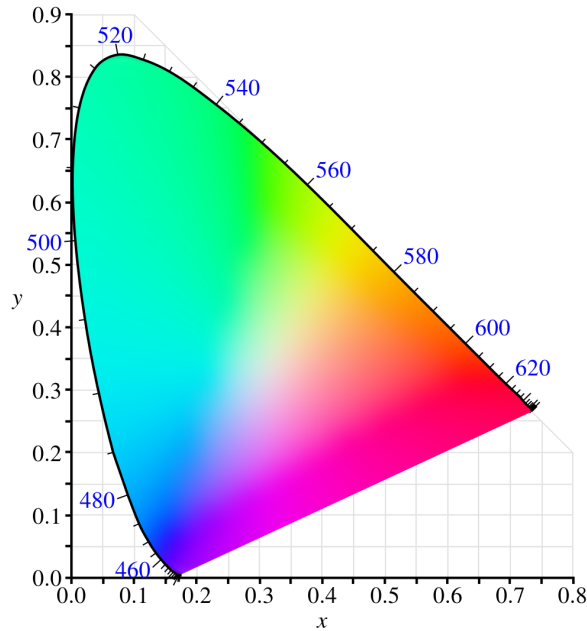


FIGURE 2.11 – Diagramme de chromaticité associé à l'espace CIE XYZ 1931. En bleu, les longueurs d'onde des rayonnements monochromatiques du visible.

Par ailleurs, dans les années 1950, Stiles & Burch (1959) ont mesuré les fonctions colorimétriques $\bar{r}_{10}(\lambda)$, $\bar{g}_{10}(\lambda)$ et $\bar{b}_{10}(\lambda)$ pour des stimuli visuels de diamètre 10° . À partir de celles-ci, la CIE a proposé les fonctions colorimétriques $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$ et $\bar{z}_{10}(\lambda)$ caractérisant la sensibilité spectrale de l'observateur standard 10° (CIE, 1964). Elles remplacent $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$ dans les équations 2.11 et 2.12 pour calculer les coordonnées trichromatiques dans l'espace CIE XYZ 1964.

Néanmoins, que ce soit dans l'espace colorimétrique CIE XYZ de 1931 ou de 1964, un problème se pose. Ces systèmes ne permettent pas de quantifier uniformément la perception des différences entre couleurs par la vision humaine. Pour pallier cela, la CIE (1978) a défini deux nouveaux espaces colorimétriques permettant de mieux représenter les différences de couleur perçues : CIE $L^*u^*v^*$ 1976 (CIELUV) et CIE $L^*a^*b^*$ 1976

(CIELAB). Nous ne présentons ici que l'espace CIELAB car il est dédié aux couleurs des surfaces et c'est donc celui qui nous a le plus intéressé dans nos travaux sur les revêtements routiers.

L'espace CIELAB caractérise une couleur par un paramètre de clarté L^* correspondant à la luminance et deux paramètres de chrominance, a^* et b^* , qui décrivent la couleur. Comme nous le disions, il a été conçu comme un espace perceptuellement uniforme, où un changement numérique donné correspond à un changement de couleur perçue de la même manière. Il est basé sur le modèle des couleurs opposées de la vision humaine, où le rouge et le vert forment une paire d'opposants, et le bleu et le jaune une autre paire d'opposants. La valeur de clarté L^* définit le noir à 0 et le blanc à 100. L'axe a^* est relatif aux couleurs opposées vert-rouge, avec des valeurs négatives vers le vert et des valeurs positives vers le rouge. L'axe b^* représente les opposés bleu-jaune, avec des valeurs négatives vers le bleu et positives vers le jaune (cf. Figure 2.12).

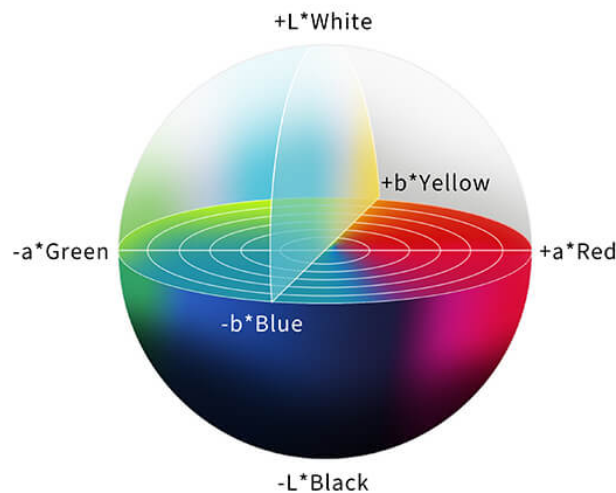


FIGURE 2.12 – Représentation graphique de l'espace CIE $L^*a^*b^*$ 1976. (Source : <https://www.linshangtech.com/tech/color-space-tech1439.html#fancybox-1>)

Les coordonnées L^* , a^* et b^* de cet espace colorimétrique peuvent être calculées à partir des valeurs du tristimulus XYZ de CIE XYZ avec les formules 2.13 et 2.14. L'indice n indique les valeurs du blanc de référence, valeurs qui dépendent du spectre de la source qui éclaire la surface dont on cherche à mesurer ou calculer les coordonnées L^* , a^* et b^* .

$$\begin{cases} L^* = 116 f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\ a^* = 500 \left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right) \\ b^* = 200 \left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right) \end{cases} \quad (2.13)$$

avec :

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & \text{si } t > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{1}{3} \left(\frac{29}{6}\right)^2 t + \frac{4}{29} & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.14)$$

Connaissant les coordonnées (L_1^*, a_1^*, b_1^*) et (L_2^*, a_2^*, b_2^*) de deux stimuli S_1 et S_2 , il est possible d'évaluer la différence de couleur entre eux, notée ΔE_{ab}^* , à l'aide d'une distance euclidienne comme suit :

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (2.15)$$

Cet écart de couleur peut ensuite être interprété en se référant aux seuils proposés par Mokrzycki & Tatol (2011) (cf. Tableau 2.1), sachant qu'il est usuel de considérer un seuil de 3 comme étant le seuil de perception d'un écart de couleur (Seymour, 2009). De plus, il faut savoir que des améliorations du calcul d'écart de couleur ont été réalisées par la CIE (ISO/CIE, 2014) mais ΔE_{ab}^* reste cependant le plus utilisé en colorimétrie moderne.

Seuils	Observations
$0 < \Delta E_{ab}^* < 1$	un observateur ne note pas de différence de couleur
$1 < \Delta E_{ab}^* < 2$	un observateur expérimenté peut noter une différence de couleur
$2 < \Delta E_{ab}^* < 3,5$	un observateur inexpérimenté peut noter une différence de couleur
$3,5 < \Delta E_{ab}^* < 5$	une différence de couleur est notée
$5 < \Delta E_{ab}^*$	un observateur perçoit deux couleurs différentes

TABLEAU 2.1 – Seuils de ΔE_{ab}^* d'après Mokrzycki & Tatol (2011).

Par ailleurs, afin d'effectuer des mesures ou des calculs colorimétriques reproductibles et répétables, la CIE a proposé des sources d'éclairage de références appelées illuminants. Les courbes associées représentant la densité spectrale relative de puissance (DSRP) en fonction de la longueur d'onde sont disponibles dans la dernière version du rapport 15 sur la colorimétrie de la CIE (CIE, 2018). Aujourd'hui, la source de référence pour l'étalonnage des systèmes de mesures photométriques est l'illuminant A. Il a été introduit en 1931 et est associé au spectre d'une lampe à incandescence. Fréquemment utilisés également, la

série des illuminants D a été introduite dans les années 1960 et représente les différentes lumières du jour. Enfin, en 2018, la CIE a proposé une nouvelle série, celle des illuminants L, afin de reproduire la DSRP de neuf types de LED.

Enfin, notons une dernière grandeur qui semble devenir de plus en plus importante dans les recommandations actuelles concernant l’éclairage : la température de couleur d’une source. Elle correspond à la température du radiateur de Planck dont le rayonnement a la même chromaticité que celle du stimulus donné³. Quelques valeurs représentatives de température de couleur sont proposées dans le tableau 2.2.

Sources de lumière	Température de couleur
Bougie	1 850 K
Soleil à l’horizon	2 000 K
Lampe au sodium haute pression	1 950 K à 2 200 K
Illuminant A	2 856 K
Lampe halogène	3 200 K
Lampe fluorescente	2 700 K à 5 000 K
LED	2 400 K à 6 500 K
Illuminant D50	5 000 K
Illuminant D65	6 500 K
Soleil au zénith	6 500 K
Ecran LCD	6 500 K à 9 500 K
Arc électrique	9 000 K

TABLEAU 2.2 – Exemples de sources de lumière et de leurs valeurs de température de couleur (*Source : <https://www.lightzoomlumiere.fr/definition/temperature-de-couleur/>*).

Cette première section de l’état de l’art nous a permis de définir les notions principales nécessaires à la compréhension du traitement d’un stimulus visuel par le SVH et de fournir les productions normalisées de la CIE pour le calcul ou la mesure de ce stimulus dans un référentiel commun. Mon sujet de thèse traitant principalement de l’éclairage routier, la section suivante s’intéressera à son histoire et notamment aux travaux qui ont amené aux recommandations actuelles.

3. Définition issue du International Lighting Vocabulary de la CIE (<https://cie.co.at/eilvterm/17-23-067>).

2.2 Éclairage routier et visibilité

Ma thèse portant sur la prise en compte des propriétés de réflexion de la lumière par les revêtements pour un éclairage adapté aux différents usagers de l'espace public, j'ai effectué des recherches bibliographiques concernant la visibilité routière et notamment ses enjeux en éclairage public et automobile.

Pour mieux dimensionner les installations d'éclairage, les éclairagistes s'inspirent de la littérature académique et de la littérature appliquée en science de la vision. Je me suis ici intéressée à cette dernière car c'est elle qui cherche à comprendre les conséquences pratiques des connaissances scientifiques pour les ingénieurs routiers et les éclairagistes, et à contribuer au dimensionnement des systèmes d'éclairage.

Je présente un ensemble d'articles dans un ordre chronologique afin de percevoir au mieux l'évolution des enjeux et la manière de les aborder au cours des cent dernières années. Un grand nombre des articles étudiés est issu de la revue de littérature de Brémond (2020).

2.2.1 Visibilité routière

Comme nous le disions dans le chapitre d'introduction, en France, l'éclairage des rues s'est imposé au XVII^{ème} siècle. Cependant, aucune réglementation n'était en rigueur pour régir la quantité de lumière utile.

C'est seulement dans les années 1920, années où les automobiles sont de plus en plus présentes, que les enjeux de l'éclairage public sont identifiés et que des textes sont publiés pour en définir les réglementations. En Grande-Bretagne, la parution du *British Standard* marque un changement : des classes d'installations basées sur des paramètres géométriques et photométriques sont définies et l'objectif n'est plus de produire un maximum de lumière mais plutôt de respecter un éclairage minimal (BSI, 1928). Aux États-Unis, le premier *Code of street lighting* de l'IESNA⁴ est publié en 1929 : il propose des règles de dimensionnement de l'éclairage des routes et des rues et décrit les facteurs qui influent sur la vision et sur la visibilité routière la nuit. L'éblouissement, l'uniformité de la luminosité

4. Illuminating Engineering Society of North America.

en surface et la correcte répartition de la lumière du luminaire sont sujets de beaucoup de discussion (Halvorson, 1936).

Par ailleurs, de nombreuses questions se posent quant au rôle de l’éclairage (Wood, 1936) et certains ingénieurs expérimentent pour apporter des premières réponses (Halvorson, 1936; Waldram, 1938). En 1928, 52 installations d’éclairage différentes sont implantées à Sheffield et permettent un grand nombre d’études qui ont montré l’importance des effets de la surface des chaussées et du placement des luminaires sur la visibilité. Suite à ces expérimentations, l’éclairage moyen devient le critère de qualité d’une installation d’éclairage dans la nouvelle version du *British Standard* (BSI, 1931).

Vers 1934, la géométrie perspective est ajoutée dans les calculs, permettant ainsi de moduler l’importance des surfaces lointaines et de prendre en compte l’angle d’observation. On comprend alors que chacun des luminaires contribue à toutes les zones de la scène visuelle du conducteur et l’attention se porte ensuite sur la luminance plutôt que l’éclairage (Waldram, 1950). Ceci constitue une avancée notable pour mieux prendre en compte les enjeux visuels de l’éclairage et les propriétés optiques des revêtements.

En 1937, le Ministère des Transports Britannique publie des recommandations⁵ pour l’éclairage public en mettant l’accent sur la sécurité routière. Une première recommandation consiste en la réduction du nombre de classes de voies (on passe de huit à deux) : le but est de permettre aux automobilistes de savoir quelles routes nécessitent l’allumage des phares et sur quelles routes l’éclairage public est suffisant. De plus, la question de la visibilité est traitée par Waldram (avec Dunbar et Smith) qui propose la notion de *revealing power*⁶ qu’il définit comme étant la capacité d’une installation d’éclairage à révéler les obstacles sur la chaussée (Waldram, 1938; Dunbar, 1938; Smith, 1938). Cette mesure dépend des luminances de la chaussée et de l’obstacle, ce qui en fait une métrique dépendant des propriétés de réflexion de la route et de l’éclairage vertical sur une cible. Waldram (1938) conclut que le *revealing power* est meilleur si les objets sont sombres et la chaussée claire (vus en « silhouette »). Dunbar (1938) note également que la qualité de l’éclairage dépend des performances visuelles des automobilistes. De ces résultats, on en déduit que les zones à faible luminosité nuisent à la bonne révélation des obstacles. C’est

5. Différentes de celles du *British Standard*.

6. Pouvoir révélateur.

pourquoi le Ministère des Transports Britannique fixe une luminance minimale, environ 0,07-0,1 footlamberts⁷, en-dessous de laquelle la chaussée ne doit pas descendre.

En 1939, éclate la Seconde Guerre Mondiale : pendant une dizaine d'années, la recherche n'est plus au coeur des préoccupations et peu de travaux sur l'éclairage public sont publiés (Waldram, 1950). On peut tout de même noter les nombreuses expériences de Blackwell pour déterminer le contraste seuil d'un observateur humain⁸ dans différentes conditions expérimentales (Blackwell, 1946). Son expérimentation consiste à projeter un cercle de lumière sur un écran blanc à environ 60 ft⁹ des observateurs qui doivent signifier où ils ont vu le stimulus. A chaque nouvelle expérience, il fait varier la luminosité du stimulus, la taille du stimulus, la luminosité de l'écran (couvrant une gamme allant de la pleine lumière du jour à un peu moins que la nuit la plus sombre) et le temps de présentation du stimulus. C'est la production de ce grand nombre de données (plus de 2 millions) qui vont permettre par la suite de construire des modèles de visibilité tels que celui d'Adrian (1989)¹⁰.

C'est ensuite dans les années 1970 que l'on observe un essor des études sur la visibilité routière, à la fois dans les journaux spécialisés (*Lighting Research and Technology, Journal of the Illuminating Engineering Society*) et à la Commission Internationale de l'Éclairage. Notamment, le rapport 19 de la CIE de 1972 est le premier document important faisant le lien entre les paramètres de l'éclairage et la performance dans une tâche visuelle et c'est d'ailleurs la première fois que le concept de « niveau de visibilité » (VL ¹¹) est proposé (CIE, 1972). Une courbe de référence représentant la performance visuelle en fonction du VL est tracée. Aussi, la performance visuelle dépendant du contraste, la CIE décrit cette relation par une courbe appelée sensibilité relative au contraste (RCS ¹²), qui se réfère à une tâche de détection standard dans des conditions standards¹³. Cependant, comme la visibilité ne dépend pas que du contraste en luminance mais aussi de la taille et la forme du stimulus, du contraste coloré, de la polarité de la lumière, etc..., l'ensemble de ces facteurs

7. Équivaut à environ 0,24-0,34 cd.m⁻².

8. Avec une probabilité de détection de 50 %.

9. Équivaut à environ 18,3 m.

10. Nous le présentons dans la suite.

11. *Visibility Level*.

12. *Relative Contrast Sensitivity*.

13. Détection d'un disque lumineux de 4' de diamètre, présenté en vision centrale pendant 200 ms, avec la luminance de fond $L_f = 100$ cd.m⁻².

est réduit à une intensité « efficace » décrite via un *Contrast Rendering Factor* (CRF). De même, l’effet d’une luminance non uniforme (due à un éblouissement par exemple) est décrite par une luminance de voile équivalente (DGF^{14}). Ainsi, la CIE définit une RCS « effective » telle que :

$$RCS_{eff} = RCS_{ref} \times CRF \times DGF \times TAF. \quad (2.16)$$

Un facteur d’inadaptation visuelle (TAF^{15}) est ajouté pour rendre compte de l’hétérogénéité lumineuse de l’environnement visuel (CIE, 1972).

Simultanément, différentes expérimentations en conduite automobile de nuit sont menées et aboutissent à différents modèles de visibilité (Gallagher & Meguire, 1975; Hills, 1975a,b, 1976; Bhise & McMahan, 1976). C’est pourtant toujours celui de la CIE qui fait l’unanimité dans les années 1980 malgré qu’il soit valable en éclairage intérieur (CIE, 1981a,b). Dans cette deuxième version du rapport 19, la CIE reprend les définitions du VL et du RCS exposées dans le rapport 19 de 1972 (CIE, 1972) et y ajoute de nouveaux éléments. Notamment, des paramètres sont introduits pour prendre en compte la taille des détails et l’âge de l’observateur. La formule donnant le VL devient donc :

$$VL = c_{seuil} \times \frac{RCS}{0.0923} \times CRF \times AF \times DGF \times TAF \quad (2.17)$$

où c_{seuil} est le contraste correspondant à une probabilité de réussite de 50 % et AF^{16} rend compte de l’effet de l’âge sur la performance visuelle. Aussi, la CIE introduit un modèle analytique de performance visuelle (VP^{17}) pour des tâches impliquant une détection de cible ou une discrimination, qui utilise le VL . Celui-ci est de la forme $VP = \log(VL)$.

Le modèle proposé est à l’époque la meilleure description disponible des effets des paramètres d’éclairage sur la performance visuelle. Cependant, des modifications sont à faire dans le cas de l’éclairage routier. Il est donc plus aisé de mesurer le VL directement plutôt que c_{seuil} et RCS (Brémond, 2020).

14. *Disability Glare Factor.*

15. *Transient Adaptation Factor.*

16. *Age Factor.*

17. *Visual Performance.*

Pour pallier cette dernière problématique, nous pouvons mentionner les travaux d'Adrian qui a décliné le concept du niveau de visibilité VL pour les applications d'éclairage routier (Adrian, 1969, 1987, 1989). Contrairement à la méthode générale des rapports CIE, Adrian cherche ici à estimer directement c_{seuil} (à travers ΔL_{seuil}) en fonction de différents paramètres, à partir de données psychophysiques disponibles dans la littérature. Pour cela, il définit tout d'abord une situation qui correspond à une situation critique en conduite de nuit. Il traite la détection d'un objet de taille angulaire $\alpha = 10'$ d'arc ayant un contraste entre 0,2 et 0,3 avec son arrière-plan. À cette fin, il considère une cible carrée d'environ 20 cm de côté qui est placée à 86 m devant le véhicule, ce qui correspond environ à la distance d'arrêt¹⁸ sur route pour un véhicule roulant à 90 km/h. En se référant à l'étude de Zwahlen (1985) sur les mouvements oculaires en conduite automobile et à d'autres études, Adrian reprend un temps d'observation de 200 ms. Enfin, contrairement à Blackwell (1946), il s'intéresse au contraste assurant une probabilité de détection de 99,93 % c'est pourquoi il donne une formule pour calculer le facteur multiplicatif permettant de passer d'une probabilité de 50 % à une probabilité donnée et obtient dans ce cas particulier un facteur de 2,6. Ainsi, à partir des données expérimentales de trois séries d'expériences psychophysiques de détection de cible, les siennes (Adrian, 1969) ainsi que celles de Blackwell (1946) et de Berek (1943), il définit un modèle de calcul complet du niveau de visibilité qui prend en compte les effets de la polarité du contraste (F_{CP}), de l'âge (AF), du temps d'exposition (TF ¹⁹) et de l'éblouissement d'incapacité (cf. Équations 2.18 et 2.19). Le modèle sera décrit en détail dans la section 3.3. À partir de son modèle, Adrian recommande un VL entre 10 et 20 pour la conduite de nuit sur route éclairée. Selon lui, un VL inférieur à 7 ne serait pas acceptable.

$$VL = \frac{\Delta L_{réel}}{\Delta L_{seuil}} \quad (2.18)$$

$$\Delta L_{seuil} = 2.6 \left[\frac{\Phi^{1/2}}{\alpha} + L^{1/2} \right] \times F_{CP} \times TF \times AF \quad (2.19)$$

avec L et Φ des fonctions qui dépendent de la luminance de fond.

A cette même époque, un autre modèle retient l'attention : celui de Rea (Rea, 1986; Rea & Ouellette, 1988, 1991). L'objectif est de relier les caractéristiques de l'éclairage aux

18. Distance pendant le temps de réaction + distance de freinage.

19. *Time Factor*.

performances des travailleurs (en intérieur). Pour cela, il cherche une tâche représentative d’une activité de bureau ou industrielle et choisit donc la comparaison entre deux listes de chiffres (*numerical verification task*). Il enregistre alors deux types de performance : le taux d’erreur dans la réalisation de la tâche et la durée d’exécution, puis construit un modèle basé sur des facteurs purement visuels (l’éclairage et le contraste) (Rea, 1986). Plus tard, il revoit son modèle et définit le temps de réaction dans une tâche de détection de cible comme mesure de performance (Rea & Ouellette, 1988). Par la suite, Rea & Ouellette (1991) reprennent ce modèle et le comparent au premier pour l’unifier en reprenant la notion de *Relative Visual Performance* qui est le rapport entre le temps de réalisation de la tâche et un temps de référence. De là, ils introduisent un terme pour tenir compte de l’âge de l’observateur et concluent en suggérant qu’il serait temps de laisser tomber les recommandations exprimées en éclairage. Malgré le fait que ce modèle n’ait pas fait l’unanimité et qu’il ait été jugé inapproprié pour modéliser la performance visuelle (surtout en intérieur) par la CIE, Brémond (2020) pense que c’est un bon modèle de la performance visuelle dans une tâche de *hazard detection* en conduite automobile.

On remarque que la visibilité a été au cœur des discussions et des expérimentations dans les années 1980 et il est donc inévitable qu’elle soit introduite progressivement dans des documents normatifs dans les années suivantes, en particulier à travers le concept de *STV* (ANSI/IESNA, 1990; CIE, 1995; ANSI/IESNA, 2000; AFE, 2002). Le *STV*, *Small Target Visibility*, est un programme de calcul proposé par Keck dans lequel la qualité d’une installation d’éclairage est évaluée par la moyenne des *VL* calculés pour une cible standard²⁰ à différents endroits de la route²¹ selon le modèle d’Adrian.

Cependant, les modèles intégrés aux textes normatifs ne sont pas complets et sont discutés par les praticiens (Lecocq, 1991; Ménard & Cariou, 1994; Bacelar et al., 1999; Güler & Onaygil, 2003). Dans son article, Lecocq (1991) complète le modèle de calcul de visibilité d’Adrian et considère des cibles hémisphériques plutôt que des cibles planes afin de mieux représenter un obstacle sur la route. Il a constaté qu’une inversion de contraste pouvait se produire lorsque la cible devenait de plus en plus claire, diminuant ainsi le *VL* moyen et pouvant alors amener à des zones d’invisibilité. Ainsi, il a remarqué qu’un modèle 3D (les ombres donc) permettait aux cibles claires d’être toujours visibles en pratique et c’est pourquoi il prend en compte la variation de luminance le long de la surface de la

20. Une cible lambertienne carrée de 18 cm de côté, de 50 % de réflectance.

21. Selon une grille régulière, avec l’observateur à 83 m.

cible en introduisant les cibles hémisphériques au modèle d'Adrian. Il conclut son article en retenant un seuil de visibilité égal à 7.

De leur côté, Ménard & Cariou (1994) testent le modèle *STV* de Keck sur la piste d'éclairage du CETE²² de Rouen. Ils font la même constatation que Lecocq : la moyenne de *VL* pose problème car elle cache les phénomènes d'inversion de la polarité des contrastes et donc les zones de visibilité nulle. Ce problème pourrait permettre à un mauvais éclairage d'être bien évalué. Selon eux, le *STV* doit être au minimum accompagné d'un indice d'uniformité du *VL* pour le design d'éclairage routier. Güler & Onaygil (2003) préconisent aussi cet indice.

Comme on a pu le voir, le modèle *STV* est très critiqué, non seulement pour l'utilisation du *VL* moyen mais aussi pour le choix arbitraire de la cible. C'est pourquoi il n'est pas recommandé par la CIE qui préfère introduire, pour la première fois, des recommandations dans l'éclairage public via des critères de visibilité, notamment en présentant le modèle d'Adrian (CIE, 1995). De l'autre côté de l'Atlantique, aux États-Unis, l'IESNA choisit de retenir dans ses textes normatifs la proposition de Keck (ANSI/IESNA, 2000). Cependant, le concept de *STV* sera abandonné en 2014 (ANSI/IESNA, 2014) tout comme la visibilité disparaîtra des recommandations de la CIE en 2010 (CIE, 2010a).

Les années 1990 sont aussi celles au cours desquelles les propriétés de réflexion des revêtements sont davantage étudiées et mises en relation avec la visibilité. Ceci est notamment rendu possible grâce aux gonioréfectomètres comme celui du LCPC²³ présenté par Coulomb & Brusque (1996). Cet appareil a été conçu dans le but de caractériser photométriquement les matériaux via la mesure du coefficient de luminance q d'une surface, rapport entre la luminance et l'éclairement (cf. Équation 2.20). Ce coefficient dépend de la nature du revêtement, de son état de surface ainsi que des directions d'éclairage et d'observation définies par les angles α , β , γ et δ (cf. Figure 2.13). Il s'exprime en $\text{cd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$.

$$q = \frac{L}{E} \quad (2.20)$$

22. Centre d'Études Techniques de l'Équipement (maintenant Cerema).

23. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

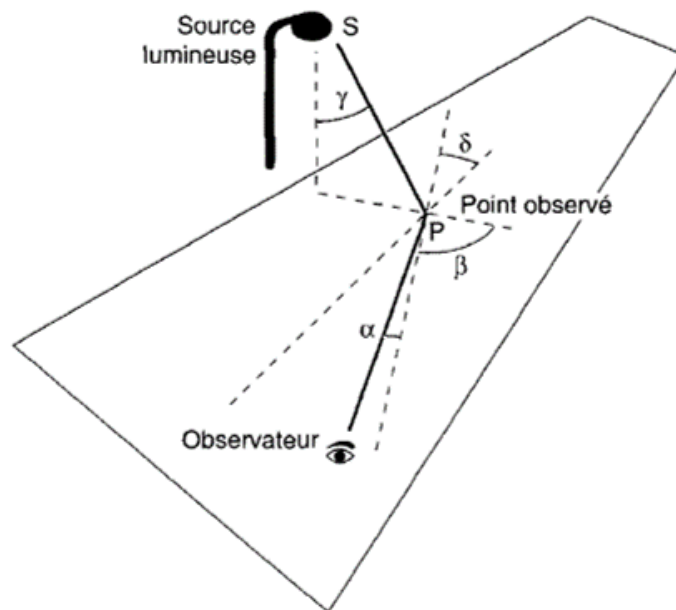


FIGURE 2.13 – Géométrie de mesure du coefficient de luminance (*Source : Coulomb & Brusque (1996)*)

Étant donné que les surfaces routières sont considérées comme isotropes, l'angle δ est négligé pour son influence quasi-nulle (CIE & PIARC, 1984). De plus, pour une installation d'éclairage, la CIE définit une distance d'observation normalisée de 60 à 160 m devant le conducteur et une hauteur d'observation de 1,5 m (CIE, 1965b). L'angle d'observation α ne varie donc qu'entre $0,5$ et $1,5^\circ$ sous l'horizontale. Entre ces limites, De Boer et al. (1952) ont prouvé que la variation de q due à α pouvait être négligée, c'est pourquoi la CIE définit l'angle d'observation égal à 1° , ce qui correspond environ au milieu du tronçon de route considéré. Le coefficient de luminance q ne dépend donc plus que de deux angles, β et γ .

A partir des mesures réalisées pour $\alpha = 1^\circ$ et une combinaison d'angles β et γ ²⁴, les propriétés de réflexion des surfaces routières peuvent être représentées sous forme de tableaux à double entrée. Pour faciliter le calcul des luminances, ces tableaux donnent en fait des coefficients réduits de luminance r définis par l'Équation 2.21 et se nomment tables- r .

24. Définis dans les textes de la CIE.

$$r = q(\beta, \gamma) \cos^3 \gamma \quad (2.21)$$

À partir de ces tables, trois paramètres caractéristiques de la réponse photométrique du matériau sont calculées pour une description macroscopique de la surface : le coefficient de luminance moyenne (ou clarté) Q_0 (cf. Équation 2.22), les coefficients de spéularité S_1 et S_2 (cf. Équations 2.23 et 2.24).

$$Q_0 = \frac{\int_0^{\Omega_0} q \, d\Omega}{\Omega_0} \quad (2.22)$$

avec $d\Omega = \sin \gamma \, d\gamma \, d\beta$ et Ω_0 est l'angle solide contenant toutes les directions de la lumière incidente.

$$S_1 = \frac{r(0, 2)}{r(0, 0)} \quad (2.23)$$

$$S_2 = \frac{Q_0}{r(0, 0)} \quad (2.24)$$

Ces facteurs (Q_0 et S_1 notamment) permettent une description du pouvoir de réflexion des revêtements et aident ainsi au dimensionnement d'installations d'éclairage. Cependant, la mesure au gonioréfectomètre des propriétés réelles d'une route nécessite d'en prélever une carotte et en fait donc une mesure destructive et peu utilisée. C'est pour cette raison que la plupart des installations d'éclairage sont dimensionnées à partir d'études reposant sur des tables- r standards et non sur les propriétés réelles de réflexion du revêtement utilisé. En France, les tables- r du système R sont utilisées et définies dans le rapport 30 de la CIE (CIE, 1976). Afin de choisir quelle classe entre RI, RII, RIII et RIV représente le revêtement que nous avons, on se réfère à la classification donnée dans le tableau 2.3 selon la valeur S_1 . Une table- r standard, R1, R2, R3 ou R4, est donnée pour chacune des classes.

Classe	Gamme du S_1	Table- r standard	Q_0 standard	S_1 standard
RI	$S_1 < 0,42$	R1	0,10	0,25
RII	$0,42 \leq S_1 < 0,85$	R2	0,07	0,58
RIII	$0,85 \leq S_1 < 1,35$	R3	0,07	1,11
RIV	$1,35 \leq S_1$	R4	0,08	1,55

TABLEAU 2.3 – Système de classification R de la CIE (1982).

La table- r standard utilisée est souvent choisie à l’appréciation de chacun, sans connaissance précise de la valeur du S_1 , dans la plupart des cas. De plus, ces tables- r standards datent des années 1970 (De Boer & Westermann, 1964) et les revêtements ont évolué ce qui les rend obsolètes (Dumont & Paumier, 2007; Muzet et al., 2018). D’ailleurs, en 1999, Khan et al. effectuent une comparaison entre des calculs de luminance et de STV faits à partir des tables- r standards, de tables- r réels mesurées et de tables- r standards « mises à l’échelle » en utilisant la méthode de normalisation par Q_0 de la CIE²⁵ (Khan et al., 1999). Ils montrent qu’il est nécessaire de modifier les tables- r standards de la CIE ou bien d’en élargir la gamme pour prendre en compte la variation globale et locale des caractéristiques de réflectance de la surface des chaussées. Ils pensent aussi qu’il faut chercher à avoir une nouvelle méthodologie, autre que celle de normalisation par Q_0 de la CIE, pour avoir une relation entre les paramètres de visibilité des chaussées calculés à l’aide de tables- r réelles et standards.

Aux États-Unis, le modèle STV continue à être utilisé pour le dimensionnement d’éclairage et Gibbons (1998) se demande dans sa thèse²⁶ si les réflexions de la lumière par les revêtements n’influencent pas la visibilité de la cible. Selon ses résultats, la prise en compte de la lumière réfléchiée par les revêtements pour les calculs du STV augmente la luminance de la cible et donc le contraste lorsque celle-ci est en contraste positif : la cible est ainsi mieux vue et on peut réduire l’éclairage. Cependant, lorsque l’objet est en contraste négatif, les réflexions sur la chaussée le rendent moins visible.

Au XXI^{ème} siècle, malgré le fait que la visibilité ait disparu des standards (CIE, 2010a; ANSI/IESNA, 2014), elle intéresse toujours les psychophysiciens et ingénieurs routiers d’autant plus que les évolutions technologiques et techniques telles que les ILMD²⁷ et les méthodes numériques en permettent une évaluation différente.

Tout d’abord, Rea et al. (2010) mettent au point un logiciel de calcul permettant d’estimer la visibilité routière dans différentes conditions d’éclairage à partir du modèle de *Relative Visual Performance* (Rea & Ouellette, 1991). Ils veulent montrer qu’un tel logiciel pourrait aider les collectivités à choisir l’éclairage public à mettre en place.

25. Méthode visant à utiliser la valeur du Q_0 pour mettre à l’échelle la table- r par pondération. On peut également utiliser le coefficient de luminance en condition de lamination diffuse Q_d , décrit dans le rapport de la CIE.

26. Son directeur de thèse était Adrian !

27. *Imaging Luminance Measurement Device*.

Joulan et al. (2011) proposent eux une approche différente, par traitement d'images. Ils utilisent un modèle de vision alternatif et ne s'intéressent plus à la visibilité de cibles uniformes mais à la visibilité des bords des objets. En effet, il a été montré dans les années 1960 que la courbe de sensibilité au contraste CSF permet de décrire entièrement la réponse du système visuel pour ce qui concerne la visibilité et on peut alors en déduire le seuil de détection. L'objectif ici a été de simuler, sur des images en luminance, cet aspect du fonctionnement de la rétine (la détection des contrastes) par des différences de gaussiennes (DoG) à différentes échelles spatiales pour reproduire la CSF. Ces DoG s'apparentent à un banc de filtres produisant chacun un signal et quand un signal est supérieur au seuil de la CSF pour la fréquence spatiale correspondante, le pixel considéré est alors estimé « visible » par l'observateur. Une carte de visibilité est ainsi obtenue en utilisant les contours plutôt que les objets eux-mêmes car ce sont eux qui sont contrastés.

D'autre part, des études sont faites pour évaluer quels facteurs peuvent potentiellement impacter la visibilité routière. Tout d'abord, Mayeur et al. (2010) s'intéressent à un ensemble de facteurs non pris en compte habituellement par les éclairagistes et montrent que l'activité de conduite (la charge mentale) a un effet sur la détection de cible : la visibilité est meilleure en statique que lorsque l'observateur est passager d'un véhicule et elle est meilleure en passager plutôt qu'en conducteur. Cette conclusion sera validée par Z. Chen et al. (2019) sur simulateur de conduite.

De leur côté, partant du constat que la luminance de la chaussée est en réalité peu uniforme, Brémond et al. (2011) étudient l'impact de son hétérogénéité sur le calcul de la visibilité tel qu'Adrian le conçoit. Pour cela, ils comparent différentes façons de calculer la luminance de fond L_f : elle est égale soit à la luminance au pied de la cible, soit à la moyenne de quatre points de mesure autour de la cible (bas, haut, gauche, droite), soit à la luminance du côté qui maximise le contraste. De plus, comme la luminance d'adaptation L_a ne correspond pas forcément à la luminance de fond dans la formule d'Adrian (1989), ils décident de comparer deux méthodes : l'estimer égale à la luminance de fond et donc variable d'une cible à l'autre, ou bien la considérer égale à la luminance moyenne de la chaussée. Les résultats d'une expérimentation psychophysique sur piste ont montré que la meilleure méthode de calcul est celle utilisant la luminance maximisant le contraste pour L_f et une valeur unique de L_a (moyenne de la chaussée). En 2019, Buyukkinaci et al. font une étude similaire et montrent qu'en prenant la luminance maximisant le contraste

comme luminance de fond, on obtient un VL environ 20% supérieur par rapport aux autres méthodes. Ce résultat souligne la nécessité de définir une méthode de calcul de la luminance de fond afin d’obtenir des résultats comparables, sans aucune différence due à la méthode utilisée.

Par ailleurs, le concept de performance visuelle est étendu à l’éclairage piéton. Dans une série d’article, Fotios s’intéresse aux déplacements piétons et à la détection d’obstacles comme tâche de référence pour les piétons (Fotios & Cheal, 2013; Fotios, Uttley, Cheal, & Hara, 2015; Fotios, Uttley, & Yang, 2015; Uttley et al., 2017; Fotios & Uttley, 2018). Il cherche à savoir quel éclairage horizontal minimal est nécessaire pour qu’un obstacle, sur la chaussée ou le trottoir, soit détecté par un piéton. Suite à une expérimentation avec sujets, Uttley et al. (2017) proposent de définir cet éclairage minimal de telle sorte qu’un objet d’une hauteur de 10 mm soit détectable par un piéton lorsque cet objet est placé au moins 3,40 m devant lui. Fotios & Uttley (2018) suggère qu’un éclairage photopique minimal de 1,0 lux est suffisant pour que les piétons se déplacent en sécurité, quel que soit leur âge et le type de lampe des luminaires.

Davoudian & Raynham (2012) s’intéressent eux à identifier et caractériser les principales tâches visuelles des piétons la nuit et les aspects clés de l’environnement visuel qui sont importants pour eux. Dans cette étude, les sujets ont dû parcourir trois itinéraires résidentiels différents en portant des lunettes oculométriques. Les résultats montrent que si les piétons passent entre 40 et 50 % de leur temps à regarder le chemin, ce temps n’est pas entièrement consacré à des tâches visuelles critiques. Regarder d’autres personnes semble être important pour les piétons, mais au cours de cette étude, le temps pendant lequel les sujets ont regardé d’autres personnes était limité. Les auteurs montrent que les tâches visuelles situées à l’écart du chemin piétonnier semblent importantes par rapport aux tâches sur le chemin piétonnier. Ils soulèvent donc des questions sur la pertinence de spécifier l’éclairage d’une route résidentielle en utilisant l’éclairage sur la route et le trottoir.

De son côté, Stockmar (2015) s’intéresse à l’éclairage en ville. Dans son étude, il suggère que la distribution de la luminance observée par les automobilistes ne correspond pas nécessairement à la distribution de la luminance attendue, calculée traditionnellement avec un angle d’observation de 1° sous l’horizontale. Il dit qu’à vitesse réduite, les conducteurs

fixent davantage leur regard sur les parties de la route situées à une distance d'environ 30 m devant le véhicule, ce qui correspond à un angle d'observation de 3° sous l'horizontale. Il propose d'étendre le concept actuel de luminance à d'autres géométries d'observation afin de faire correspondre les valeurs des critères de qualité d'éclairage (luminance moyenne, uniformités générale et longitudinale) (CEN, 2015c) à l'impression visuelle attendue (Stockmar, 2015). Les premières mises en œuvre de ce nouveau concept, que ce soit dans des calculs de dimensionnement (Greffier et al., 2021) ou lors de mesures *in situ* (Greffier et al., 2019), montrent que la luminance perçue par l'automobiliste diminue avec l'augmentation de l'angle d'observation ce qui suggère des conditions de visibilité différentes selon la géométrie d'observation associée à un mode de déplacement particulier.

Ces dernières années, les standards en éclairage public sont de plus en plus critiqués. Raynham (2004) critique le British Standard de 2003. Selon lui, c'est mieux de s'appuyer sur des données comportementales pour mieux choisir la tâche de référence : reconnaissance des visages pour les piétons et guidage visuel pour les automobilistes. D'ailleurs, concernant l'éclairage piéton, Fotios & Gibbons (2018) critiquent l'absence de référence expérimentale connue ayant permis la définition des classes de voie et des niveaux d'éclairage, et la faiblesse des fondements scientifiques qui ont conduit à utiliser l'éclairage semi-circulaire comme critère pour la reconnaissance des visages. Ils pointent également du doigt le fait que les recommandations en éclairage public soient faites à partir de données photopiques alors qu'on est le plus souvent dans le domaine mésopique.

De leur côté, Muzet et al. (2020) soulignent le fait que les spécifications actuelles sur l'éclairage et la photométrie des revêtements ont été développées pour les automobilistes et pour des applications interurbaines. En effet, les principaux critères de performance sont basés sur la luminance de la chaussée éclairée et pour mesurer ces performances, il y a une géométrie standard d'observation de la route. L'œil de l'observateur est considéré à 1,5 m au-dessus de la chaussée et l'angle sous lequel il la regarde est de 1° sous l'horizontale. Ceci correspond à une distance d'observation de 86 m devant le véhicule. Cette géométrie est bien adaptée à la conduite interurbaine pour des vitesses de l'ordre de 90 km/h. En revanche, pour la conduite de nuit en zone urbaine, quand les vitesses sont plutôt comprises entre 30 et 50 km/h, la distance d'observation diminue et l'angle associé tend donc à augmenter. Cela semble encore plus vrai si on s'intéresse à d'autres usagers comme les cyclistes ou les piétons. Il y a donc un besoin pour l'éclairage des villes et les usagers

autres qu’automobilistes.

De plus, Muzet et al. (2020) nous rappellent que les références concernant la photométrie des revêtements datent d’il y a une quarantaine d’années. Or, les conditions visuelles de conduite, les chaussées, les luminaires, les revêtements ainsi que le trafic ont changé depuis. L’utilisation de ces données de référence entraînent donc entre 30 % et 50 % d’erreurs (Ogando-Martínez et al., 2020). Comme le soulignent Ogando-Martínez et al., il est nécessaire d’en refaire de nouvelles, reflétant mieux la réalité. C’était notamment l’objectif du projet européen EMPIR SURFACE qui a proposé de nouvelles données de référence pour les revêtements routiers et de nouvelles géométries de référence pour la mesure du facteur de luminance. On peut noter qu’après avoir étudié les suggestions de Fotios & Uttley (2018) et Chain & Marchaut (2008), les acteurs du projet proposent de garder un angle d’observation de 1° pour l’interurbain et un angle égal à $2,29^\circ$ en mesure urbaine, 5° pour l’urbain à faible vitesse, les cyclistes et les scooters, et 10° ou 20° pour les piétons et l’évaluation de la pollution lumineuse. Ils proposent également de garder une hauteur des yeux à 1,50 m car elle semble adéquate pour tous les usagers.

En attendant que de nouvelles références de revêtements soient publiées, on cherche des méthodes pour prendre en compte au mieux la photométrie réelle des revêtements dans les calculs de performance des installations d’éclairage. Il faut savoir qu’il est possible d’obtenir la BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) d’un revêtement avec un gonioréfectomètre mais les données résultantes sont souvent irrégulières et toujours partielles du fait des problèmes techniques pour les directions de rétro réflexion et les angles rasants. Dumont et al. (2011) proposent une solution pour obtenir une BRDF complète qui consiste à interpoler et à extrapoler à partir des données disponibles.

Par ailleurs, il a été mis au point des appareils de mesure portables : ils ne donnent pas une mesure de la table- r complète mais permettent d’étudier l’évolution des revêtements au cours du temps et ainsi d’adapter l’éclairage (Muzet et al., 2020). Aussi, des méthodes numériques d’estimation de la photométrie des revêtements ont été mis au point. Galatanu & Canale (2020) déduisent le coefficient réduit r à partir de la mesure de luminance d’un revêtement avec une caméra étalonnée en luminance. De leur côté, Ogando-Martínez et al. (2020) proposent d’obtenir une table- r en utilisant une estimation géométrique basée sur une surface tri-ellipsoïde. Boucher & Greffier (2022) utilisent une analyse en

composante principale et une carte de luminance obtenue par caméra pour estimer la table- r de différents revêtements sur route.

On peut noter qu'aujourd'hui il y a une réelle volonté de changer les normes et recommandations en vigueur. Certains se demandent si le calcul du VL d'Adrian ne pourrait pas être un bon critère d'évaluation d'une installation d'éclairage et s'il ne devrait donc pas réintégrer les textes standards (Brémond et al., 2013; Buyukkinaci et al., 2018). En 2013, Brémond et al. cherchent à savoir si le VL est un bon modèle de visibilité dans le contexte de l'éclairage automobile. Ils regardent si la visibilité est approximativement constante (quelle que soit la cible) au moment de la détection : cette constante est appelée *field factor* expérimental. Pour cela, ils estiment la distance de détection d'un ensemble de cibles standards sur un simulateur de conduite. Le résultat intéressant de cette étude est que la distance de visibilité moyenne observée au moment de la détection, quelle que soit la cible, est très proche de la distance de visibilité calculée via le modèle d'Adrian avec un *field factor* de 7 ($VL = 7$), pour une situation simple sans trafic. Aussi, ils valident le choix d'une petite cible carrée comme cible de référence pour l'évaluation de la visibilité car c'est selon eux le pire des scénarios. Güler & Onaygil (2003) disaient déjà qu'un objet de 20 cm \times 20 cm présente la taille minimale d'un objet pouvant présenter un danger pour un véhicule de taille normale.

Aussi, Buyukkinaci et al. (2018) étudient également le VL , cette fois pour une installation d'éclairage. Il regardent si le seuil de visibilité est le même pour différentes températures de couleur, différentes classes d'éclairage et différentes réflectances de cible. L'objectif est de généraliser les résultats estimant qu'un VL entre 7 et 10 est pertinent pour la visibilité routière. Pour $VL \geq 7$, tous les participants voient les cibles dans toutes les conditions : ils en déduisent que le VL est un bon critère de qualité des installations d'éclairage.

Ces dernières études (Brémond et al., 2013; Buyukkinaci et al., 2018) militent pour réinterroger l'usage du VL dans les normes et recommandations, d'autant plus qu'il permettrait des économies d'énergie selon le rapport 115 de la CIE (CIE, 1995). L'efficacité énergétique est d'ailleurs un des sujets les plus importants de ces dernières années. Pour essayer de réduire l'éclairage à une valeur minimale tout en se conformant à la situation réelle et aux normes en vigueur, Viorel et al. (2019) étudient trois facteurs qui leur

semblent influents : le facteur de maintenance f_m , la distance entre les luminaires²⁸ et la classification des routes. Ils concluent qu’en prenant en compte ces facteurs, l’économie annuelle d’énergie peut atteindre dans certains cas plus de 40 % de la consommation annuelle totale. Par ailleurs, le suivi d’un chantier expérimental mettant en œuvre le procédé Lumiroute® de l’entreprise Spie batignolles malet a montré que la prise en compte des propriétés de réflexion du revêtement pour adapter les niveaux d’éclairage peut amener jusqu’à 70 % d’économie d’énergie par rapport à un dimensionnement classique, pour un revêtement dit « performant » (Nicolai et al., 2016; Muzet et al., 2018). Muzet et al. (2022) font une conclusion similaire et ont également montré que la multitude de revêtements que l’on peut trouver aujourd’hui ne peut pas être décrite par les tables- r standard de la CIE. Ils remarquent aussi que la considération de ces tables- r standards provoquent même des non-conformités par rapport aux niveaux recommandés.

2.2.2 Recommandations actuelles

Ce retour cent ans en arrière nous a permis de voir l’évolution des enjeux et pratiques de l’éclairage routier qui ont conduit aux recommandations actuelles. Dans cette section, nous exposerons les méthodes de mesure et calcul de performance des installations d’éclairage ainsi que les niveaux recommandés pour les critères de qualité définis aujourd’hui comme des références.

Les recommandations (CIE, 2010a, 2011, 2019b) et les normes d’éclairage routier en Europe (CEN, 2015a,b,c,d) définissent les exigences de performance et précisent les conventions mathématiques et les procédures à adopter pour calculer ou mesurer les performances photométriques des installations d’éclairage public. Elles tiennent compte des besoins visuels des usagers de la route et des aspects environnementaux de l’éclairage public.

Tout d’abord, afin de savoir à quelles exigences répondre, le CEN (2015a) et la CIE (2010a) définissent des ensembles de classes d’éclairage. Il en existe 3 principales :

- les classes M pour le trafic motorisé uniquement,
- les classes C pour les zones de conflit, c’est-à-dire les zones où véhicules motorisés, cyclistes et piétons se partagent les voies de circulation ou se croisent,

28. Prendre la distance réelle plutôt que celles recommandées car en général les routes ne sont pas droites et la distance est donc diminuée.

- les classes P pour les zones piétonnes ou de faible circulation où les modes actifs sont majoritaires.

Le choix de l'ensemble de classes réalisé en fonction de la zone étudiée, la détermination de la classe la plus adaptée se fait en évaluant plusieurs paramètres :

- les caractéristiques de la route et la vitesse maximale autorisée,
- le volume du trafic et sa composition (motorisé uniquement, mixte, modes actifs uniquement),
- la luminosité ambiante,
- la charge mentale.

L'évaluation de chaque paramètre donne un facteur qui va permettre de pondérer la classe d'éclairage à atteindre. Ensuite, on se référera aux tableaux du CEN (2015b) (et CIE (2010a)) pour connaître les seuils minimaux de luminance pour les classes M, ou d'éclairement horizontal pour les classes C et P, à atteindre.

Ces critères de qualité d'une installation d'éclairage sont évalués selon une grille de points normalisée soit par le calcul pour le dimensionnement (CEN, 2015c; CIE, 2019b) soit pour l'évaluation des performances d'une installation d'éclairage sur site réel (CEN, 2015d; CIE, 2011). Le maillage est compris entre deux luminaires consécutifs d'une même rangée d'interdistance S et la position des points de calcul est définie de façon à être espacés régulièrement dans le champ de calcul (cf. Figure 2.14). Dans la direction longitudinale, l'interdistance D entre les points (en mètres) est $D = S/N$, où $N = 10$ pour $S \leq 30$ m et N est le plus petit entier donnant $D \leq 3$ m pour $S > 30$ m. Dans la direction transversale, l'interdistance d (en mètres) est définie par $d = W/3$ avec W la largeur de la voie en mètres. Pour le calcul ou la mesure des luminances, on considère un observateur qui a les yeux à 1,5 m au-dessus du niveau de la route et situé à 60 m devant le maillage. Dans la direction transversale, il est placé au centre de chaque voie l'une après l'autre et pour chaque position la luminance moyenne L_{moy} , les uniformités générale U_0 et longitudinale U_l ainsi que l'augmentation relative au seuil de perception f_{TI} sont calculées.

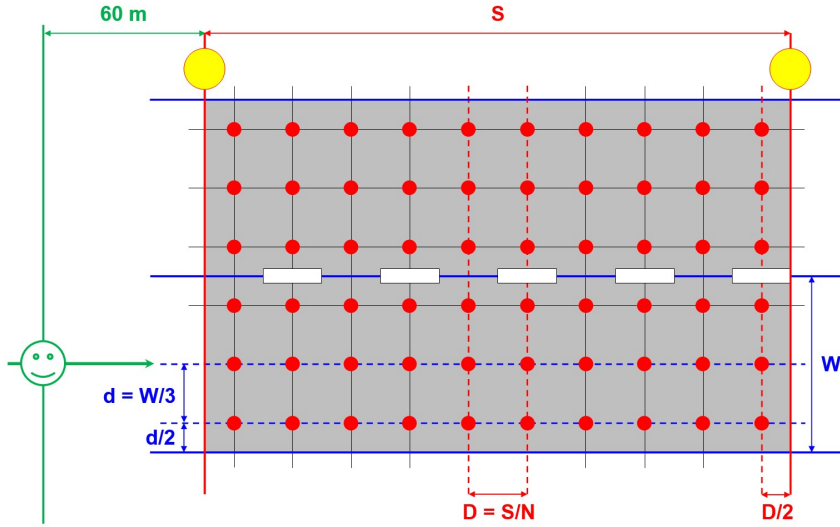


FIGURE 2.14 – Grille normalisée pour le calcul ou la mesure des critères de performances d’une installation d’éclairage, selon la norme européenne (CEN, 2015c,d).

La luminance moyenne L_{moy} est définie comme la moyenne arithmétique des n luminances L_i obtenues aux points du maillage avec $n = N \times 3 \times nb_{voies}$.

$$L_{moy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i \quad (2.25)$$

L’uniformité générale U_0 est calculée comme le rapport entre la luminance la plus faible L_{min} et la luminance moyenne.

$$U_0 = \frac{L_{min}}{L_{moy}} \quad (2.26)$$

L’uniformité longitudinale U_l est calculée comme le rapport entre la luminance minimale $L_{min,voie}$ et la luminance maximale $L_{max,voie}$ dans la direction longitudinale, le long de la ligne médiane de chaque voie, celle où est située l’observateur.

$$U_l = \frac{L_{min,voie}}{L_{max,voie}} \quad (2.27)$$

L’augmentation relative au seuil de perception f_{TI} , ou *threshold increment*, est calculé pour l’installation dans son état initial, lorsque les luminaires sont neufs et que les sources lumineuses émettent le flux lumineux initial. Il est calculé à partir de la formule 2.28. Ce critère rend compte de l’éblouissement d’incapacité dû aux sources d’éclairage situées dans le champ de vision. En effet, ces sources provoquent un voile lumineux, représenté par la

luminance de voile équivalente L_v , qui se superpose sur la rétine aux luminances de la scène observée, réduisant ainsi les contrastes. f_{TI} représente l'augmentation nécessaire en % de la valeur du contraste d'une cible pour qu'elle soit détectable en présence de sources lumineuses dans le champ de vision. Le calcul de la luminance de voile équivalente L_v est basé sur les travaux de Holladay (1926, 1927) (cf. Équations 2.29, 2.30 et 2.31).

$$f_{TI} = 65 \frac{L_v}{L_{moy}^{0,8}} \quad (2.28)$$

pour $0,05 \text{ cd.m}^{-2} < L_{moy} \leq 5 \text{ cd.m}^{-2}$.

$$L_v = \sum_{k=1}^n L_{v_k} \quad (2.29)$$

Où :

L_v est la luminance de voile totale (en cd.m^{-2});

L_{v_k} est la luminance de voile produite par le $k^{\text{ième}}$ luminaire (en cd.m^{-2});

n est le nombre de luminaires considérés.

La contribution du $k^{\text{ième}}$ luminaire à la luminance de voile totale, L_{v_k} , est calculée suivant la valeur de son excentricité θ_k soit par la formule 2.30 soit par la formule 2.31.

Si $1,5^\circ < \theta_k < 60^\circ$,

$$L_{v_k} = 9.86 \left[1 + \left(\frac{\hat{\text{Age}}}{66,4} \right)^4 \right] \frac{E_k}{\theta_k^2} \quad (2.30)$$

Si $0,1^\circ < \theta_k < 1,5^\circ$,

$$L_{v_k} = 5 \left[1 + \left(\frac{\hat{\text{Age}}}{62,5} \right)^4 \right] \frac{E_k}{\theta_k^2} + 10 \frac{E_k}{\theta_k^3} \quad (2.31)$$

Où :

E_k est l'éclairement (en lux) au centre de l'œil de l'observateur produit par le $k^{\text{ième}}$ luminaire sur un plan normal à la ligne de visée et à la hauteur de l'œil de l'observateur;

θ_k est l'angle entre la ligne de visée et la ligne passant par l'œil de l'observateur et le centre du $k^{\text{ième}}$ luminaire (en $^\circ$);

$\hat{\text{Age}}$ est l'âge de l'observateur (en années).

On donne dans le Tableau 2.4 les exigences concernant ces quatre critères pour les classes M, celles qui concernent le trafic motorisé, de la zone partagée avec des véhicules

roulant à moins de 30 km/h (M6) jusqu’à l’autoroute (M1).

Classe	L_{moy} (cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (%)
M1	2,00	0,40	0,70	10
M2	1,50	0,40	0,70	10
M3	1,00	0,40	0,60	15
M4	0,75	0,40	0,60	15
M5	0,50	0,35	0,40	15
M6	0,30	0,35	0,40	20

TABLEAU 2.4 – Exigences pour les critères de performance des classes M d’après CEN (2015b)

Tous ces critères dépendant de la luminance, les propriétés optiques des revêtements entrent en compte et sont fondamentales pour un bon dimensionnement d’une installation d’éclairage.

En dépit de ces recommandations, prendre en compte les caractéristiques photométriques réelles d’une route pour concevoir puis régler une installation d’éclairage est rarement fait. L’utilisation des tables- r standards est devenue une habitude malgré les possibilités de mesurer les tables- r réelles directement sur site de manière non destructive soit à l’aide d’un gonioréfectomètre portable (Goyat & Guillard, 2002; Muzet et al., 2008) soit à partir de mesures faites par ILMD (Ogando-Martínez et al., 2020; Boucher & Greffier, 2022).

2.3 La réalité virtuelle

Ces dernières années, les technologies de réalité virtuelle (RV) ont connu une croissance exponentielle et sont devenues un outil de choix dans divers domaines. En aménagement urbain, l’utilisation du numérique permet de modéliser, simuler, visualiser et même expérimenter. Les villes font de plus en plus appel à des jumeaux numériques, répliques virtuelles de leur territoire, pour cibler les besoins et cas d’usages pertinents pour la planification urbaine. La première partie de cette section reprendra un certain nombre de travaux portant sur l’utilisation de logiciels de RV pour réaliser des simulations d’environnements physiquement réalistes.

Par ailleurs, les technologies de RV sont également utilisées pour une grande variété d'applications en interaction avec un utilisateur, comme la formation, la thérapie, la recherche psychologique et médicale, et le divertissement. Nous concernant, nous nous intéresserons plus particulièrement dans la seconde partie de cette section à l'utilisation de la RV pour des expérimentations avec sujets. Nous parlerons des techniques de navigation utilisées et de l'étude du comportement et de la prise d'information visuelle en environnement urbain.

2.3.1 Pour simuler des phénomènes physiques

De par la thématique de mes travaux de thèse, nous nous intéressons dans cette partie à la simulation de la lumière en environnement virtuel. Cela concerne la reproduction de la chaîne lumineuse d'une scène en partant du réglage du flux lumineux jusqu'à la luminance observée, en passant par l'éclairage au sol.

L'utilisation de la réalité virtuelle immersive (RVI) permet de surmonter certains obstacles à la réalisation d'essais dans des environnements réels comme le contrôle des conditions lumineuses, la modification des conditions visuelles et l'étude en toute sécurité d'environnements dangereux. Le facteur clé pour l'utilisation de ces environnements et auquel nous nous intéressons ici est la capacité à reproduire un environnement lumineux, non seulement perçu comme la réalité, avec une distribution correcte de la lumière, mais aussi capable de rendre compte quantitativement de cette lumière. Nombreuses sont les études cherchant à reproduire des éclairages réalistes en RV (pour la plupart en intérieur) (Y. Chen et al., 2019; Donzallaz, 2019; May et al., 2020; Jia et al., 2014; Tahrani et al., 2005; Heydarian et al., 2015, 2017; Chamilothoni et al., 2019; Natephra et al., 2017; Greule & Braun, 2017), mais très peu s'intéressent à la correspondance physique du rendu qui est généré.

Comme le soulignent Scorpio et al. (2020), il y a un manque de littérature scientifique sur l'évaluation de la précision des systèmes de RV dans la reproduction de la distribution de la lumière. Cette reproduction inexacte rend quasi-impossible la réalisation d'une scène lumineuse en RV correspondant à la réalité. Cela implique également une incapacité à évaluer quantitativement la lumière en RV. Cependant, c'est bien l'utilisation de ces critères quantitatifs basés sur des unités photométriques qui sert à évaluer les performances des

systèmes d’éclairage. Cela affecte donc fortement l’utilisation des systèmes de RV en tant qu’outil de conception de l’éclairage.

Une reproduction correcte de la lumière du point de vue photométrique est nécessaire pour les recherches relatives aux effets de la lumière sur l’impression visuelle subjective (Chamilothori et al., 2019). Cependant, selon Scorpio et al. (2020), le problème de la distribution efficace de la lumière est un sujet qui n’a pas encore été pris en compte dans l’éclairage extérieur. On peut tout de même citer Greule & Braun (2017) qui ont recréé une place de la ville allemande de Darmstadt à l’aide de trois logiciels différents (Photoshop, Relux Suite 2016 et Unity 3D) et ont ensuite généré 19 scénarios d’éclairage en modifiant les conditions de luminosité de différents éléments de la scène. Les résultats ont mis en évidence la possibilité d’utiliser la RV pour évaluer des scénarios d’éclairage extérieur et comparer différents systèmes d’éclairage de façon qualitative et subjective.

Cependant, même si l’absence de recherche visant à simuler la lumière pour les zones extérieures est notable, nous pouvons nous intéresser aux études conduites sur la distribution de la lumière dans les environnements virtuels intérieurs. En effet, les systèmes de RV reproduisent la lumière de la même manière quel que soit l’environnement. On peut donc noter certaines études sur la distribution de la lumière du jour (Chamilothori et al., 2019), de la lumière artificielle (Abd-Alhamid et al., 2019) et de leur intégration dans les systèmes de RV (Heydarian et al., 2015, 2017; Natephra et al., 2017).

Très souvent, la distribution de la lumière du jour dans la RV est étudiée à l’aide de viso-casques afin d’afficher des scènes immersives à 360° réalisées à l’aide du logiciel de simulation physique Radiance. Chamilothori et al. (2019) ont présenté une nouvelle méthode visant à obtenir des environnements virtuels immersifs à partir de rendus dans lesquels le comportement de la lumière a été simulé en unité photométrique. Le logiciel Radiance a été utilisé pour générer six vues à gamme dynamique élevée (HDR) d’une pièce. Les images HDR ont ensuite été traitées pour construire des images 360° de la pièce qui ont été importées dans le moteur de jeu Unity 3D pour produire un modèle virtuel immersif de la salle de test et être montré aux utilisateurs à l’aide d’un viso-casque. Sept scènes lumineuses pour un ciel clair et deux pour un ciel couvert ont été créées. Les résultats ont confirmé l’adéquation de cette méthode en tant qu’alternative aux expérimentations en environnement réel, pour les expériences subjectives visant à étudier la perception des

espaces intérieurs éclairés par la lumière du jour. Cette méthode permet de surmonter la difficulté de contrôler la variation des conditions lumineuses, l'un des principaux défis des études expérimentales utilisant la lumière du jour. Sa nouveauté réside dans la mise en œuvre de rendus physiques dans un environnement virtuel immersif.

De leur côté, Abd-Alhamid et al. (2019) ont étudié la possibilité de reproduire la distribution de la lumière artificielle en utilisant la RV. Pour cela, ils ont recréé une pièce avec des murs et un plafond peints en blanc en combinant six images HDR fish-eye (180° dans chaque direction) acquises depuis le même point de vue pour former une image à 360°. Cette image a ensuite été présentée aux participants à l'aide d'un viso-casque et on leur a demandé d'effectuer certaines tâches visuelles basées sur la discrimination des couleurs et la sensibilité au contraste. Les mêmes tâches ont également été réalisées en environnement réel et les performances ont été comparées. Les résultats ne mettent pas en évidence de différences significatives entre les deux environnements sur la base des paramètres étudiés. Bien que les attributs relatifs à la qualité de la scène (couleurs, détails et contraste) aient été perçus comme sensiblement différents de ceux de l'environnement réel, les tâches objectives ont montré qu'il était possible de produire un contraste et une apparence de couleur similaires dans l'environnement virtuel, avec un impact mineur sur les détails fins en raison de la résolution limitée. Abd-Alhamid et al. (2019) en concluent que la RV peut être un support de représentation alternatif prometteur pour étudier les perceptions visuelles.

Heydarian et al. (2017) ont utilisé la RVI pour évaluer les effets de l'intégration de la lumière du jour et de la lumière artificielle sur la perception des utilisateurs de l'environnement virtuel. Contrairement à la plupart des recherches, l'environnement virtuel a d'abord été construit dans Revit© 2015, puis importé dans 3DS Max© (où des informations sur le mobilier, les propriétés des matériaux et les cartes d'éclairage ont été ajoutées au modèle), et enfin importé dans le moteur de jeu Unity 3D. Pour pallier son incapacité à fournir des valeurs d'éclairage, le modèle RV a été importé dans Rhinoceros 3D et Grasshopper pour effectuer les analyses d'éclairage et d'environnement. Les résultats soulignent la pertinence de la RV pour recueillir les préférences des utilisateurs finaux en matière d'éclairage et les avantages de son utilisation au stade de la conception des bâtiments pour améliorer les économies d'énergie et répondre aux attentes des utilisateurs.

Natephra et al. (2017) ont proposé une nouvelle méthode appelée *BIM-based lighting design feedback* (BLDF) pour simuler l’éclairage naturel et l’éclairage artificiel dans les bâtiments et visualiser des scènes 3D réalistes à l’aide de visio-casques. Pour cela, ils ont créé une interface conviviale utilisant le moteur de jeu Unreal Engine 4. L’utilisateur peut définir différents paramètres et effectuer des simulations jusqu’à ce qu’il obtienne une conception satisfaisante. La justesse de la simulation de l’éclairage de la méthode proposée a été évaluée en comparant les valeurs d’éclairement de BLDF avec des données expérimentales ainsi qu’avec celles calculées avec Radiance et 3DS Max©. Les résultats montrent que le BLDF aide les acteurs de la conception à mieux percevoir et optimiser les conditions d’éclairage afin d’atteindre un degré de satisfaction plus élevé en termes de conception de l’éclairage et d’économies d’énergie.

De ces précédentes études, nous pouvons en déduire quelques informations utiles pour étudier la capacité des systèmes de RV à reproduire le comportement physique de la lumière dans les environnements virtuels extérieurs. Tout d’abord, l’utilisation d’images HDR 360° calibrées peut permettre une reproduction correcte de la distribution lumineuse et les visio-casques semblent être le meilleur équipement pour une perception exacte de celle-ci. Aussi, les moteurs de jeu peuvent être utilisés pour une reproduction correcte de la distribution lumineuse mais ne permettent pas une évaluation directe des valeurs d’éclairement et de luminance. Une idée serait de calibrer photométriquement les moteurs de jeu afin de les utiliser comme outils dans la conception et la recherche en matière d’éclairage.

Scorpio et al. (2020) se sont penchés sur cette problématique et ont utilisé le moteur de jeu Unreal pour analyser la capacité de la RV à prendre en compte les paramètres d’éclairage, qui n’ont pas encore été étudiés dans la littérature actuelle, et pour mettre en évidence le potentiel de la RV pour améliorer la conception de l’éclairage. Les résultats soulignent l’efficacité d’Unreal dans la simulation de presque tous les critères d’éclairage (à l’exception de la reconnaissance faciale et de l’éblouissement) et confirment l’intérêt de l’utilisation de la RV dans la conception de l’éclairage. Les auteurs soulignent tout de même que des recherches supplémentaires sont nécessaires pour établir sa fiabilité, en particulier du point de vue photométrique. En 2022, ils présentent une nouvelle méthodologie pour utiliser Unreal Engine 4.22 comme outil pour les applications d’éclairage, permettant une reproduction correcte de la distribution de la lumière artificielle dans le moteur de

jeu en identifiant et en réglant correctement un ensemble restreint de paramètres (Scorpio et al., 2022). Pour cela, ils reproduisent une pièce de bureau à la fois dans le moteur Unreal et dans le logiciel DIALux evo, logiciel de conception d'éclairage, à des fins de comparaison. Ensuite, la distribution de la luminance est calculée avec les deux programmes sur les mêmes surfaces dans l'environnement virtuel et comparée à l'environnement réel. Les résultats suggèrent une bonne fiabilité de Unreal Engine dans la reproduction de la distribution de la lumière, soulignant de légères différences dans certaines conditions. L'avantage de la méthode décrite dans cet article est la possibilité d'utiliser Unreal Engine pour l'ensemble du processus de préparation et de présentation des scènes virtuelles. En effet, aucun logiciel de simulation supplémentaire ou caméra HDR n'est nécessaire pour calculer, mesurer ou simuler la distribution de la luminance sur les surfaces internes de l'environnement virtuel.

Ces dernières années, les moteurs de jeux ont proposé de nouveaux *pipelines* de rendu utilisant des techniques d'éclairage basées sur la physique comme Unity 3D et son *pipeline* HDRP (Donzallaz, 2019). Malgré cela, l'utilisation des moteurs de jeu restent très compliquée pour l'évaluation d'une installation d'éclairage du fait de la méconnaissance des modèles et algorithmes utilisés pour coder la propagation de la lumière.

2.3.2 Pour des expérimentations avec sujets

Même si les technologies de RV ne permettent pas de simulation quantitative de la lumière, nous avons vu qu'elles sont devenues des outils de choix pour les expériences avec sujets en raison de leur capacité à créer des environnements immersifs et à simuler des situations réelles ou imaginaires de manière contrôlée.

Nous avons vu dans la section 2.2.1 que les standards en éclairage public sont de plus en plus critiqués et notamment l'utilisation du fameux angle de 1° . On cherche donc à savoir quels sont les réels besoins en éclairage pour les différents types d'utilisateurs en essayant de comprendre quels sont les endroits regardés et avec quels angles d'observation.

Par exemple, Winter et al. (2017) ont mené une étude sur les mouvements oculaires des conducteurs après la tombée de la nuit, le long de deux routes à Berlin, une route principale et une rue résidentielle. Ils ont constaté que le comportement visuel différait entre les deux types de route. Dans la dimension horizontale, les mouvements oculaires

sont plus largement répartis sur la route résidentielle que sur la route principale. En particulier, sur la route principale, l’attention se concentre sur le centre de la route, alors que sur la route résidentielle, la tendance est à regarder également l’à-côté de la voie, l’emplacement des piétons potentiels et les carrefours où la priorité est donnée à ceux qui s’engagent sur la route. Ces distributions reflètent la tendance du conducteur à regarder vers les lieux de danger potentiel.

Cependant, à cause des difficultés de mise en œuvre des expérimentations avec oculomètre en condition réelle, certains travaux ont été développés à partir d’environnements urbains simulés. Deux principales approches ont été déployées :

1. l’approche non-immersive basées sur une projection d’images sur écran plat,
2. les approches immersives basées sur l’utilisation d’écrans hémicylindriques de grandes dimensions, de CAVE (Cruz-Neira et al., 1992) ou d’un viso-casque.

Le principal avantage de la seconde approche réside dans le fait que l’utilisateur est immergé au sein de l’environnement urbain virtuel. Un état de l’art des différents types de simulateurs utilisés dans le cadre de la conduite automobile est proposé par Richard et al. (2017).

Différents travaux ont utilisé, pour des contraintes budgétaires principalement, une configuration non-immersive basée sur un volant, des pédales et un simple moniteur. Par exemple, Ménétrier et al. (2017) et Gac et al. (2019) ont utilisé ce type de configuration pour étudier les processus cognitifs impliqués dans la conduite.

Aussi, dans l’activité de conduite automobile, la vision est considérée comme source principale d’informations (Summala et al., 1996; Sivak, 1996). Cependant, on dénote des problématiques liées à l’immersion ou à la synchronisation du simulateur et de l’oculomètre (Simon et al., 1999). Mais l’un des problèmes principaux liés à la perception visuelle en environnement virtuel concerne la perception des distances (Paille et al., 2005; Kemeny & Panerai, 2003). Knapp & Loomis (2003) ont étudié cette question et reportent que la sous-évaluation des distances perçues est inversement proportionnelle à l’amplitude du champ de vision. Il constitue donc un paramètre majeur à prendre en compte dans la construction d’un simulateur de conduite. D’ailleurs, on peut noter plusieurs études le concernant (Crundall et al., 1999; Kemeny & Panerai, 2003; Allahyari et al., 2007; Colombet et al., 2010). Allahyari et al. (2007) ont examiné la relation entre le champ de

vision utile et les mesures de performance de la conduite sur simulateur. Ils montrent une corrélation significative et négative entre le champ de vision utile et la performance en simulateur. Les résultats indiquent qu'une réduction de 40 % du champ visuel utile, quel que soit l'âge, augmente le risque d'implication dans un accident. De leur côté, Colombet et al. (2010) ont étudié l'effet d'un changement du champ de vision de la caméra virtuelle, utilisée par le logiciel de simulation, sur la perception de la vitesse en simulateur de conduite dynamique. Ils ont trouvé que le changement visuel, entre le champ de vision du conducteur couvert par l'écran (constant) et le champ de vision de la caméra virtuelle, a un impact significatif sur la vitesse qu'atteignent les sujets. Ils montrent donc que la vitesse perçue augmente avec ce facteur d'échelle visuelle.

En ce qui concerne les techniques de navigation en environnements virtuels (EV), différentes approches ont été proposées depuis les années 90. Nous pouvons par exemple citer la téléportation (Boletsis, 2017) ou des techniques plus exotiques telles que celle du WIM²⁹ proposée par Stoakley et al. (1995) et la technique du 3D Cone Drag proposée plus récemment par Käser et al. (2017) pour la navigation dans *Google Earth VR*. La technique WIM permet de se déplacer dans un EV grâce à une représentation réduite de celui-ci, placée dans la main de l'utilisateur. La technique « 3D Cone Drag » permet à l'utilisateur de naviguer dans l'EV en effectuant des mouvements de la main du type « grab & drag » (Danyluk & Willett, 2019). Une technique très utilisée et sécurisée consiste à se déplacer dans l'EV à l'aide d'un simple joystick. Ces techniques ont toutes des bénéfices et des désavantages. Par exemple, la téléportation produit moins de cinétose³⁰ que les techniques proposant un mouvement continu dans l'environnement virtuel mais elle peut être source de désorientation. Quand le système le permet (zone de captation importante) ou lorsque l'environnement virtuel a une dimension relativement restreinte, c'est la marche réelle qui est bien sûr recommandée, ou des techniques émulant la marche réelle comme le step-in-place (Bouguila et al., 2004) ou la technique du arm-swinging (Foloppe et al., 2018). Dans ce contexte, nous pouvons également citer la technique du « Redirected walking » qui repose sur une manipulation de l'EV pour contrôler la trajectoire de l'utilisateur immergé (Vasylevska et al., 2013). Cette technique très intéressante permet de rallonger artificiellement le parcours emprunté par l'utilisateur et de lui donner l'impression qu'il se déplace en ligne droite alors que son mouvement réel n'est pas rectiligne.

29. *World in Miniature*.

30. Mal du simulateur.

Le dernier point de questionnement lors du montage d'une expérimentation avec sujets en EV est de savoir si les techniques utilisées ont une influence ou non sur les résultats. Mackenzie & Harris (2014) présentent une étude utilisant l'oculométrie pour observer les différences de comportement oculomoteur entre une tâche passive de perception des dangers basée sur une vidéo et une tâche active de conduite simulée de perception des dangers. Les résultats montrent des différences, ce qui souligne la nécessité d'étudier les compétences de conduite dans des conditions plutôt actives, où le participant est engagé dans une tâche de conduite. De leur côté, Foulsham et al. (2011) ont cherché à savoir si les gens répartissent leur regard de la même manière lorsqu'ils sont immergés et en mouvement dans le monde réel que lorsqu'ils regardent des clips vidéo pris du point de vue d'un marcheur. Les participants ont porté un oculomètre mobile pendant qu'ils marchaient dans la rue. Ils ont ensuite visionné des vidéos de la marche du premier participant en laboratoire. Les auteurs ont noté des différences dans les zones de fixation ainsi que dans la manière et le moment où les éléments d'intérêt étaient regardés. Ces résultats constituent un réel questionnement quant à la relation entre le comportement réel et les mouvements oculaires mesurés face à une vidéo.

2.4 Problématique

Toutes les réflexions menées notamment en section 2.2 autour de l'éclairage public et des revêtements routiers nous amènent à nous poser de nombreuses questions. Le modèle de niveau de visibilité *VL* d'Adrian devrait-il être réintégré aux textes normatifs pour permettre une meilleure évaluation des performances des installations d'éclairage public comme le proposent certains ? Vu les évolutions des technologies d'éclairage et celles en rapport avec le trafic routier, les conditions expérimentales de l'époque sont-elles toujours valables ? Des adaptations seraient-elles nécessaires ? Aussi, ce modèle peut-il être appliqué à des usagers autres qu'automobilistes ? Si on ne considère pas le *VL*, quelles sont les modifications à faire pour que les recommandations correspondent au mieux aux besoins de tous ? La couleur a-t-elle un impact sur la visibilité et la notion de contraste coloré doit-elle donc être considérée ? L'éclairage automobile est complètement absent des calculs de performance de l'éclairage public, cela doit-il changer ? Si oui, comment le prendre en compte ? Si non, comment faire en sorte qu'il n'intervienne pas ? Etc...

Nous ne pourrions pas répondre à toutes ces questions mais nous nous focaliserons sur quelques unes. Plus particulièrement, mon projet de recherche propose de simuler et évaluer l'effet des revêtements sur la visibilité. Cela implique de réinterroger un certain nombre de pratiques notamment dans le domaine de l'éclairage public. Pour les raisons que j'évoquais dans la section 2.2, la communauté scientifique du domaine de l'éclairage et de la photométrie des revêtements s'accorde sur la nécessité de reconsidérer la géométrie standard à 1° en éclairage urbain, de définir de nouveaux angles d'observation plus adaptés aux usages nocturnes de l'espace public et à ses différents types d'utilisateurs, et de mieux considérer les propriétés réelles de réflexion des revêtements.

Pour cela, le chapitre 3 sera consacré à l'estimation des performances d'une installation d'éclairage par simulation. À cette fin, nous avons développé un logiciel de calcul d'éclairage, équivalent au logiciel DIALux®, dans lequel nous avons fait des ajouts par rapport à ce dernier. Ce logiciel a ensuite été adapté afin de prendre en compte les propriétés réelles de réflexion du revêtement mis en œuvre puisque la conception d'une installation d'éclairage routier nécessite une combinaison des propriétés photométriques de la surface de la route et des caractéristiques optiques des luminaires. Ainsi, nous pourrions évaluer la contribution réelle du revêtement, en comparer plusieurs et estimer les erreurs provoquées par l'utilisation des tables- r standards. Enfin, nous avons vu dans la section 2.2.1 que l'évaluation d'un critère de visibilité était auparavant recommandé et que certains chercheurs proposent aujourd'hui de le réintégrer aux normes d'éclairage. Nous avons donc décidé d'ajouter à notre logiciel un calcul du niveau de visibilité d'une cible en suivant le modèle du VL d'Adrian afin d'évaluer s'il nous apporte des informations complémentaires pour une meilleure évaluation des performances des installations d'éclairage public.

Cela nous amènera dans le chapitre 4 à proposer une évolution des pratiques actuelles. En effet, nous le disions dans la section 2.2.2, les exigences en termes d'éclairage sont définies pour trois ensembles de classes (M, C et P) selon le type de trafic. Cependant, on note que les recommandations associées aux classes M sont données en luminance alors que celles des classes C et P sont en éclairement (horizontal) (CEN, 2015c; CIE, 2010b). On s'intéresse d'un côté à la lumière qui arrive jusqu'à l'œil de l'utilisateur, après réflexion sur la surface de la route, et d'un autre côté, seule la mesure de la quantité de lumière sur la chaussée est considérée. Cela nous interpelle puisque l'éclairage urbain se doit de répondre aux besoins visuels de tous les utilisateurs de l'espace public afin de leur assurer « une

sécurité et un confort aussi élevés que possible » (CIE, 1965b). Il semble donc essentiel d'exprimer ces besoins en valeurs de luminance non seulement pour les automobilistes mais aussi pour les cyclistes et les piétons. Dès lors, pour identifier les besoins de lumière sur les surfaces routières, il faut savoir où les usagers regardent afin de leur offrir la juste quantité de lumière, celle nécessaire à la sécurisation de leurs déplacements. Pour répondre à cette question, nous avons mis au point une expérimentation avec sujets utilisant des techniques de RV couplées à de l'eye-tracking afin d'étudier l'influence de la modalité de déplacement sur l'angle d'observation. Les résultats ont ensuite été intégrés au logiciel de calcul pour évaluer l'impact du changement de la géométrie d'observation sur les critères de qualité d'une installation d'éclairage et sur le critère de visibilité. Des mesures sur site expérimental ont également été réalisées et une comparaison entre simulations et mesures a été faite. Les conclusions de ce chapitre nous amèneront à proposer des adaptations des recommandations actuelles.

Le chapitre 5 traitera de différents travaux menés dans la perspective de la suite de ce projet de recherche. Une première partie concernera la colorimétrie des revêtements. On y exposera une étude sur l'évolution de la couleur des revêtements due au vieillissement naturel. Aussi, des réflexions seront faites sur la possibilité d'un lien entre la coordonnée L^* de l'espace CIELAB et l'albédo d'un revêtement. La deuxième partie sera consacrée à une étude exploratoire de simulation d'installation d'éclairage et de revêtement routier de façon physiquement réaliste dans le moteur de jeu Unity 3D. Enfin, nous concluons sur les travaux de thèse dans le chapitre 6 et annoncerons quelques limites et perspectives supplémentaires.

IMPACT DU REVÊTEMENT EN ÉCLAIRAGE ROUTIER

Il y a 30 ans, on constatait que la construction d'éclairage routier réduisait les accidents nocturnes de 20 à 40 % (CIE, 1992). Cependant, il a aussi été montré qu'une mauvaise conception de l'éclairage peut être pire que pas d'éclairage du tout (Van Bommel & Tekelenburg, 1986). Il est donc important de dimensionner correctement l'éclairage routier.

À cette fin, les éclairagistes utilisent des logiciels tels que DIALux® pour estimer les performances d'installations d'éclairage et les comparer aux recommandations et normes d'éclairage routier. Cependant, ils ne prennent généralement pas en compte les propriétés réelles de réflexion des revêtements, bien que les logiciels offrent cette possibilité. Afin d'étudier l'impact du revêtement en éclairage, il nous a semblé important de développer notre propre logiciel.

Dans ce chapitre, nous présentons le logiciel développé, une comparaison avec les résultats des situations tests fournies par la CIE (2019b) pour sa validation ainsi que les ajouts réalisés par rapport à un logiciel « classique » de dimensionnement d'éclairage. Nous avons inclus la possibilité d'utiliser des tables- r mesurées ce qui nous a permis d'évaluer la contribution réelle du revêtement, en comparer plusieurs et estimer les écarts provoqués par l'utilisation des tables- r standards. Nous avons également ajouté un calcul du niveau de visibilité d'une cible en nous appuyant sur le modèle d'Adrian et en l'adaptant pour prendre en compte le revêtement. L'intérêt de ce critère est évalué dans des calculs d'éclairage puis par des mesures.

3.1 Développement d'un logiciel d'éclairage

3.1.1 Description du logiciel

Comme nous le disions dans le chapitre 2, les recommandations et les normes d'éclairage routier en Europe définissent les exigences de performance selon des classes d'éclairage (CIE, 2019b; CEN, 2015c). Elles précisent les conventions mathématiques et les procédures à adopter pour calculer ou mesurer les performances photométriques des installations d'éclairage public. C'est sur ces documents de référence que nous nous sommes appuyés pour le développement de notre propre logiciel d'estimation des performances d'installations d'éclairage nommé ESPRIE (EStimation des PeRformances d'une Installation d'Eclairage).

The screenshot shows the ESPRIE software interface with the following sections:

- Luminaires:** Disposition (Unilatérale en bas), Hauteur (8 m), Inclinaison (0°), Orientation (0°), Rotation (0°), Interdistance (30 m), Avancée/retrait (0 m), Flux (6000 lumens), Facteur de maintenance (0.9), Distribution lumineuse (Upload).
- Observateur:** Type d'usager (Automobiliste en interurbain), Âge (23).
- Chaussée:** Nombre de chaussée (1), Nombre de voie (2), Largeur chaussée (6.5 m), Largeur séparateur (0 m), Propriétés de réflexion à 1° (R1), Mise à l'échelle par Q0, Inclure un calcul de visibilité, Sur-échantillonnage, Export des résultats.
- Performances cibles:** Sélection de la classe d'éclairage (M1), Luminance moyenne (2.00 cd/m²), Uniformité générale (0.40), Uniformité longitudinale (0.70), Augmentation relative au seuil de perception (10.0%), Éclairage horizontal moyen (40.00 lux), Uniformité horizontale (0.40), Rapport d'éclairage des abords (0.35).

FIGURE 3.1 – Interface d'accueil du logiciel ESPRIE.

ESPRIE est un ensemble de fonctions de calcul programmées sous Matlab R2018a. La Figure 3.1 présente l'interface d'accueil du logiciel permettant à l'utilisateur de définir l'installation dont il souhaite évaluer les performances. Dans la première partie appelée « Luminaires », l'utilisateur renseigne toutes les informations concernant la géométrie d'installation des luminaires ainsi que leurs caractéristiques photométriques. En particulier, il choisit tout d'abord la disposition des luminaires parmi 5 configurations (cf.

Tableau 3.1). Il définit ensuite la hauteur H des mâts, les angles d'inclinaison δ , d'orientation ν et de rotation Ψ du luminaire (cf. Figure 3.2), l'interdistance S entre luminaires et leur avancée (ou retrait) T par rapport au bord de la chaussée. Il spécifie ensuite le flux lumineux, le facteur de maintenance fm et charge le tableau de distribution d'intensité lumineuse décrivant le comportement photométrique du luminaire.

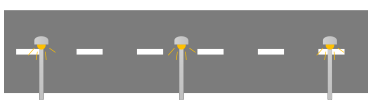
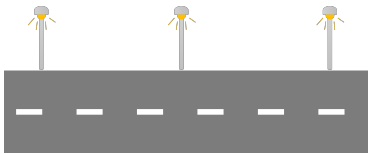
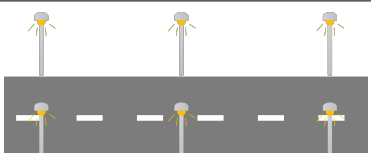
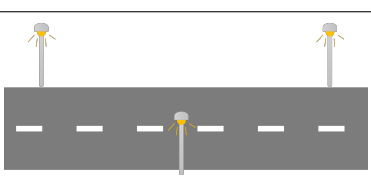
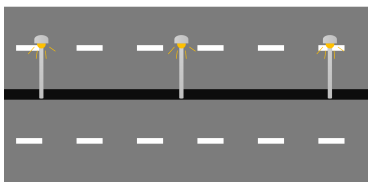
Unilatérale en bas	Luminaires d'un seul côté, en bas	
Unilatérale en haut	Luminaires d'un seul côté, en haut	
Bilatérale en face à face	Luminaires des deux côtés, en face à face	
Bilatérale en décalé	Luminaires des deux côtés, en quinconce	
Sur séparateur central	Luminaires au milieu des voies sur séparateur central	

TABLEAU 3.1 – Définition des 5 types de disposition possibles pour les luminaires dans ESPRIE.

La seconde partie importante pour l'utilisateur est la partie appelée « Chaussée ». L'utilisateur doit y entrer les caractéristiques du site évalué telles que le nombre de chaussées et de voies, la largeur W_r de la chaussée et la largeur W_{cr} du séparateur central s'il y en a un. Il choisit également le type de revêtement auquel il a affaire entre RI, RII, RIII et RIV. Enfin, avant de lancer le calcul, l'utilisateur choisit la classe d'éclairage qui correspond à son installation dans la partie « Performances cibles » afin de définir les niveaux à atteindre.

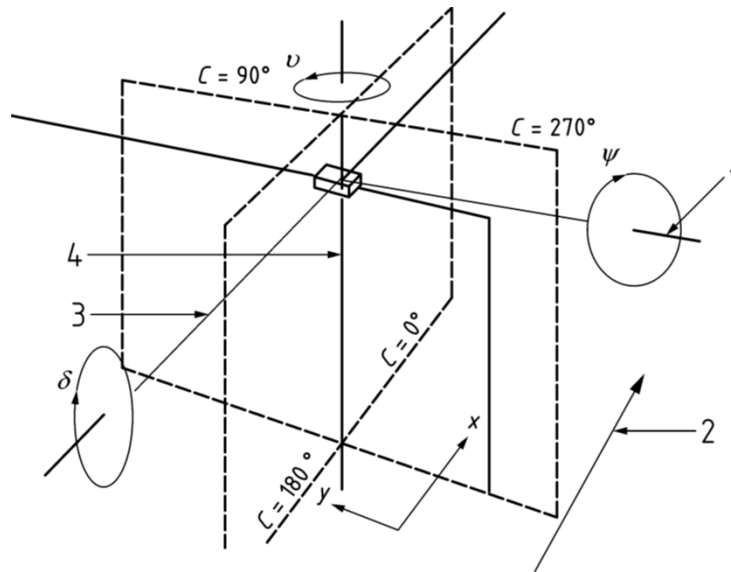


FIGURE 3.2 – Axes de rotation du luminaire par rapport au système de coordonnées (x,y,z) (Source : Norme EN 13201-3 :2015 (CEN, 2015c)).

3.1.2 Validation du logiciel

En annexe du rapport 140, la CIE fournit les données de 7 situations test pour vérifier la bonne mise en oeuvre des calculs photométriques (CIE, 2019b). Dans l'objectif de valider notre logiciel, nous avons utilisé ces données et avons comparé les résultats obtenus avec ceux escomptés. Nous comparons aussi avec les résultats obtenus sous DIALux® afin de positionner les performances de notre logiciel par rapport à un logiciel largement utilisé dans les bureaux d'études d'éclairage.

Les Tableaux 3.2 et 3.3 résument les données des 7 situations fournies par la CIE. Le revêtement routier est considéré comme R3 pour toutes les situations. Le facteur de maintenance est de 0,80 pour toutes les situations. L'âge de l'observateur est de 23 ans. Les tableaux d'intensité lumineuse des luminaires de chaque situation et la table-*r* RIII ont été téléchargés sur le site web de la CIE¹.

Les tableaux 3.4 et 3.5 résument les valeurs à atteindre données dans le rapport 140 de la CIE (en bleu) ainsi que les résultats obtenus avec le logiciel DIALux® (en orange) et notre logiciel ESPRIE (en jaune) et les écarts relatifs. Les quantités évaluées sont :

- la luminance moyenne L_{moy} en $cd.m^{-2}$,

1. http://files.cie.co.at/957_TC_4-15_Test_Data.zip

Situation	Disposition des luminaires	S (en m)	T (en m)	H (en m)	δ (en °)	Flux (en lm)
1	Unilatérale en haut	20	2	4	0	1800
2	Bilatérale en décalé	20	2	4	0	1800
3	Unilatérale en haut	45	0	10	5	10 500
4	Bilatérale en décalé	35	0	8	5	10 500
5	Bilatérale en face à face	54	0	12	5	10 500
6	Sur séparateur central	75	-2,25	18	5	32 000
7	Unilatérale en haut	40	0	10	5	13 000

TABLEAU 3.2 – Données des 7 situations de la CIE concernant l'installation d'éclairage (CIE, 2019b).

Situation	Nombre de chaussées	Nombre de voies par chaussée	W_r (en m)	W_{cr} (en m)
1	1	2	10,0	0
2	1	2	10,0	0
3	1	2	7,5	0
4	1	2	7,0	0
5	2	3	10,5	1,5
6	2	2	7,0	6
7	1	2	8,0	0

TABLEAU 3.3 – Données des 7 situations de la CIE concernant la chaussée (CIE, 2019b).

- l'uniformité générale de luminance U_0 ,
- l'uniformité longitudinale de luminance U_l ,
- la luminance de voile équivalente L_v en cd.m^{-2} ,
- le *threshold increment* f_{TI} en %,
- le rapport d'éclairiment des abords R_{EI} ²,
- l'éclairiment horizontal moyen E_{moy} en lx,
- l'uniformité d'éclairiment U_h .

Les valeurs fournies par notre logiciel montrent des écarts relatifs de moins de 5 % avec les valeurs de la CIE. Ces écarts étant très faibles, nous considérons que notre logiciel est validé. De plus, on remarque que les résultats d'ESPRIE sont aussi proches, voire plus, que ceux fournis par DIALux®, prouvant un niveau de performance au moins équivalent.

		Situation 5				
		CIE	DIALux®		ESPRIE	
Observateur 1	L_{moy}	0,44	0,43	-2%	0,44	0%
	U_0	0,45	0,43	-4%	0,45	0%
	U_l	0,79	0,79	0%	0,79	0%
	L_v	0,105	×		0,105	0%
	f_{TI}	11,0	11	0%	11,0	0%
Observateur 2	L_{moy}	0,42	0,41	-2%	0,42	0%
	U_0	0,57	0,56	-2%	0,57	0%
	U_l	0,71	0,72	1%	0,73	3%
	L_v	0,095	×		0,095	0%
	f_{TI}	10,4	10	-4%	10,4	0%
Observateur 3	L_{moy}	0,41	0,40	-2%	0,41	0%
	U_0	0,67	0,66	-1%	0,67	0%
	U_l	0,75	0,73	-3%	0,75	3%
	L_v	0,063	×		0,063	0%
	f_{TI}	7,1	7	-1%	7,1	0%
	R_{EI}	0,76	×		0,76	0%
	E_{moy}	7,00	7,04	1%	7,04	1%
	U_h	0,28	0,27	-4%	0,28	0%

TABLEAU 3.4 – Résultats de simulation pour la 5^{ème} situation test de la CIE.

2. La norme EN 13201 nous dit que « le R_{EI} est la valeur minimale obtenue à partir de l'évaluation sur chaque côté de la chaussée du rapport de l'éclairiment horizontal moyen sur la bande longitudinale adjacente au bord de la chaussée et située en dehors de la chaussée, divisée par l'éclairiment horizontal moyen sur la bande longitudinale correspondante située sur la chaussée » (CEN, 2015c).

		Situation 1				Situation 2				Situation 3								
		CIE	DIAL _{lux}	ESPRIE		CIE	DIAL _{lux}	ESPRIE		CIE	DIAL _{lux}	ESPRIE						
Obs 1	L_{moy}	0,26	0,25	-4%	0,26	0%	0,26	0%	0,26	0%	0,26	0%	0,55	0,54	-2%	0,55	0%	
	U_0	0,14	0,14	0%	0,14	0%	0,32	-3%	0,32	0%	0,32	0%	0,52	0,51	-2%	0,52	0%	
	U_l	0,56	0,55	-2%	0,56	0%	0,33	0%	0,33	0%	0,33	0%	0,68	0,67	-1%	0,68	0%	
	L_v	0,877	×		0,897	2%	0,636		0,636	0%	0,130	×	0,131	×		0,131	1%	
	f_{TI}	141	126	-11%	144,5	2%	101		104,5	3%	11,5	10	11,6	10	-13%	11,6	1%	
Obs 2	L_{moy}	0,26	0,26	0%	0,26	0%	0,26	0%	0,26	0%	0,26	0%	0,60	0,60	0%	0,60	0%	
	U_0	0,15	0,15	0%	0,15	0%	0,35	-9%	0,35	0%	0,35	0%	0,54	0,52	-4%	0,54	0%	
	U_l	0,64	0,68	6%	0,64	0%	0,33	0%	0,33	0%	0,33	0%	0,70	0,68	-3%	0,70	0%	
	L_v	0,314	×		0,329	5%	0,626		0,644	3%	0,138	×	0,139	×		0,139	1%	
	f_{TI}	49,7	50	1%	52,0	5%	99		102,3	3%	11,3	11	11,3	11	-3%	11,3	0%	
REI	0,32	×		0,31	-3%	0,47		0,47	0%	0,64	×	0,64	×		0,64	0%		
E_{moy}	2,50	2,54	2%	2,52	1%	2,50		2,53	1%	7,80	7,85	1%	7,80	7,85	1%	7,77	0%	
U_h	0,28	0,28	0%	0,28	0%	0,32		0,32	0%	0,34	0,34	0%	0,34	0,33	-3%	0,34	0%	
Obs 1	L_{moy}	0,88	0,87	-1%	0,88	0%	1,17	-1%	1,17	0%	0,53	0,53	0%	0,53	0%	0,53	0%	
	U_0	0,54	0,52	-4%	0,54	0%	0,49	-4%	0,47	0%	0,45	0,44	-2%	0,45	0,44	-2%	0,45	0%
	U_l	0,53	0,51	-4%	0,53	0%	0,62	-2%	0,61	0%	0,84	0,86	2%	0,84	0,86	2%	0,84	0%
	L_v	0,228	×		0,228	0%	0,239		×	2%	0,173	×	0,173	×		0,173	0%	
	f_{TI}	13,8	13	-6%	13,8	0%	11,5		11	1%	15,6	15	15,6	15	-4%	15,6	0%	
Obs 2	L_{moy}	0,87	0,86	-1%	0,87	0%	1,30	0%	1,30	0%	0,58	0,58	0%	0,58	0%	0,58	0%	
	U_0	0,51	0,50	-2%	0,51	0%	0,49	-2%	0,48	0%	0,46	0,46	0%	0,46	0%	0,46	0%	
	U_l	0,53	0,51	-4%	0,53	0%	0,72	-4%	0,69	0%	0,91	0,89	-2%	0,91	0,89	-2%	0,91	0%
	L_v	0,227	×		0,228	0%	0,181		×	2%	0,127	×	0,127	×		0,127	0%	
	f_{TI}	13,8	13	-6%	13,9	1%	8,0		7	1%	10,6	10	10,6	10	-6%	10,6	0%	
REI	0,61	×		0,61	0%	0,67		×	0%	0,62	×	0,62	×		0,62	0%		
E_{moy}	12,0	12,0	0%	11,97	0%	16,2		16,0	-1%	7,00	7,04	1%	7,00	7,04	1%	7,01	0%	
U_h	0,49	0,49	0%	0,49	0%	0,50		0,50	0%	0,50	0,50	0%	0,50	0,50	0%	0,50	0%	

TABLEAU 3.5 – Résultats des simulations de performance pour 6 des 7 situations tests de la CIE.

3.2 Intégration des propriétés optiques des revêtements

3.2.1 Options ajoutées au logiciel

Maintenant que nous avons validé notre logiciel, nous nous intéressons à ce pourquoi nous avons fait le choix de le développer : pouvoir y ajouter des options comblant quelques manques des logiciels « classiques ». La première option concerne la prise en compte du revêtement. En effet, la conception d'une installation d'éclairage routier nécessite de combiner les caractéristiques optiques des luminaires et les propriétés photométriques de la surface de la route. Cependant, les luminances ponctuelles calculées avec les logiciels de dimensionnement s'écartent souvent des valeurs mesurées. Cela est notamment dû à l'utilisation des tables- r standards dans les logiciels et donc aux écarts entre ces tables- r standardisées et les valeurs des tables- r réelles.

Pour diminuer ces écarts, la CIE propose de mettre à l'échelle les tables- r standards en utilisant une méthode de normalisation par Q_0 (CIE, 2001). Chaque coefficient réduit de luminance est pondéré par le rapport du Q_0 réel sur le Q_0 de la table- r standard. Cette normalisation est disponible sur notre logiciel en cochant une case comme le montre la Figure 3.3, à gauche. Par ailleurs, si nous disposons du coefficient de clarté Q_0 de notre revêtement, c'est que, la plupart du temps, nous avons mesuré sa table- r . Alors pourquoi ne pas l'utiliser directement ? Notre logiciel offre également la possibilité de charger la table- r réelle³ de notre revêtement pour évaluer les performances telles qu'on pourrait les mesurer (cf. image de droite sur la Figure 3.3). Ainsi, il nous est possible d'étudier la contribution réelle du revêtement et l'impact de l'utilisation des tables- r standards sur les performances évaluées.

3.2.2 Contribution du revêtement aux performances d'une installation d'éclairage

On décide d'évaluer les performances de deux installations d'éclairage avec des revêtements différents. On simule et on compare les résultats obtenus en utilisant les tables- r réelles des revêtements, les tables- r standards correspondantes et les tables- r standards

3. Avec l'extension *.mat* de Matlab ou *.gon*, fichiers de mesure au gonioréfléctomètre de laboratoire du Cerema de Clermont-Ferrand.

The figure shows two screenshots of the 'Chaussée' (Road) panel in the ESPRI software. Both panels have the following fields: 'Nombre de chaussée' (1), 'Nombre de voie' (2), 'Largeur chaussée (en m)' (6.5), and 'Largeur séparateur (en m)' (0). The 'Propriétés de réflexion à 1°' dropdown is set to 'R1' in both. In the left screenshot, the 'Mise à l'échelle par Q0' checkbox is checked and set to 0, and there are checkboxes for 'Inclure un calcul de visibilité' and 'Sur-échantillonnage'. In the right screenshot, the dropdown menu is open, showing a list of options: R1, R2, R3, R4, Lumiroute S1 T0, Lumiroute S1 T36, Lumiroute S2 T0, Lumiroute S2 T36, Lumiroute S3 T0, Lumiroute S3 T36, Lumiroute S4 T0, Lumiroute S4 T36, and Autre.

FIGURE 3.3 – Panel « Chaussée » du logiciel ESPRI. À gauche est illustrée la possibilité de normaliser la table- r standard choisie à l’aide de Q_0 . À droite, choix possible de table- r réelle.

normalisées par Q_0 . Cette étude est réalisée en simulant le site de l’expérimentation du procédé Lumiroute® de Spie batignolles malet à Limoges (cf. Figure 3.4).

Le site expérimental est situé sur un boulevard périurbain (boulevard Schuman) à Limoges, en France (Muzet et al., 2018). Il s’agit d’une route à 2×2 voies de 6,50 m de large et 400 m de long. La réserve centrale de 4,25 m de large est équipée d’un système d’éclairage de 9 m de haut avec une double disposition centrale et un retrait de 0,62 m par rapport au bord de la chaussée. Les revêtements routiers de l’ensemble du boulevard Schuman sont du type béton bitumineux très mince avec une granulométrie 0/10 mm. La zone de calcul se compose de deux sections de 200 m de part et d’autre du boulevard (cf. Figure 3.4). Les sections 1 et 2 sont des sections innovantes appelées sections Lumiroute® et les sections 3 et 4 sont des sections de contrôle classiques. Les sections 1 et 4 sont des sections brutes tandis que les surfaces des sections 2 et 3 sont traitées au jet d’eau à haute pression pour éliminer la fine couche bitumineuse de la surface. La photométrie de la surface de la route de chaque section a été caractérisée par le gonioréfectomètre de laboratoire du Cerema (Muzet et al., 2019) et est présentée dans le Tableau 3.6. On a

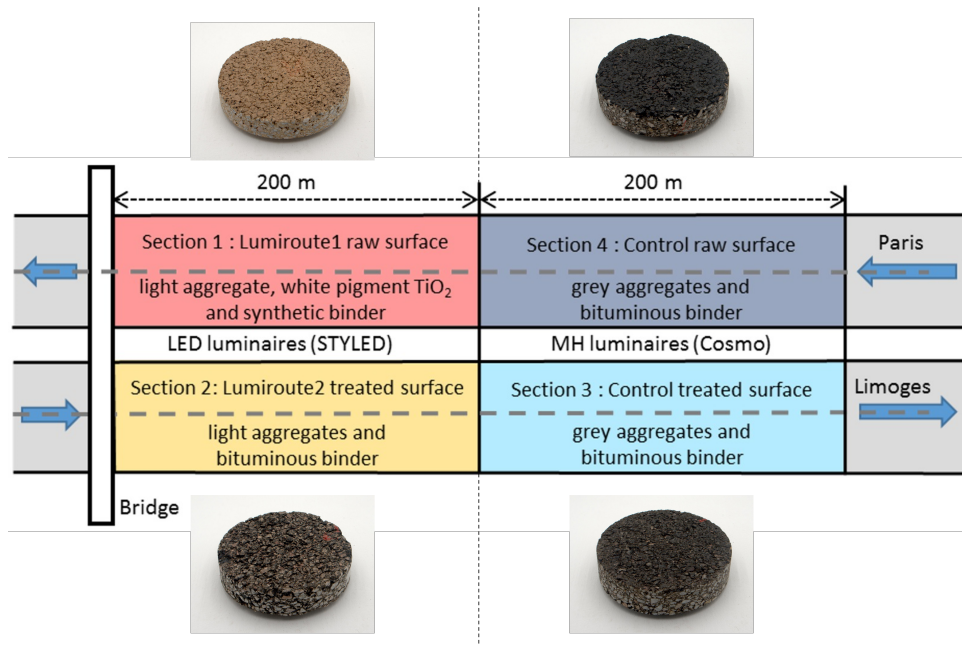


FIGURE 3.4 – Schéma du site expérimental Lumiroute® à Limoges (France) avec une photographie de chaque revêtement juste après la mise en œuvre.

également tracé les solides photométriques pour $\alpha = 1^\circ$ de chaque revêtement pour représenter leur capacité de réflexion (cf. Figure 3.5). Le volume du solide est relié à Q_0 : plus il est important, plus le revêtement est réfléchissant et donc Q_0 est grand. Le coefficient S_1 est lui lié au lobe qui part vers la droite : plus le lobe est conséquent, plus le revêtement a un caractère spéculaire.

	Section 1 : Lumiroute® 1	Section 2 : Lumiroute® 2	Section 3 : Classique traitée	Section 4 : Classique brute
Q_0	0,119	0,111	0,086	0,089
S_1	0,74	0,54	0,73	0,91
Table- r standard correspondante	R2	R2	R2	R3

TABLEAU 3.6 – Caractéristiques photométriques des différentes sections du site expérimental Lumiroute®.

Les sections de contrôle 3 et 4 sont éclairées par un éclairage aux halogénures métalliques tandis que les deux sections Lumiroute® composées de surfaces claires sont illuminées par des luminaires à LED. Étant donné que la disposition de l'éclairage est du type central

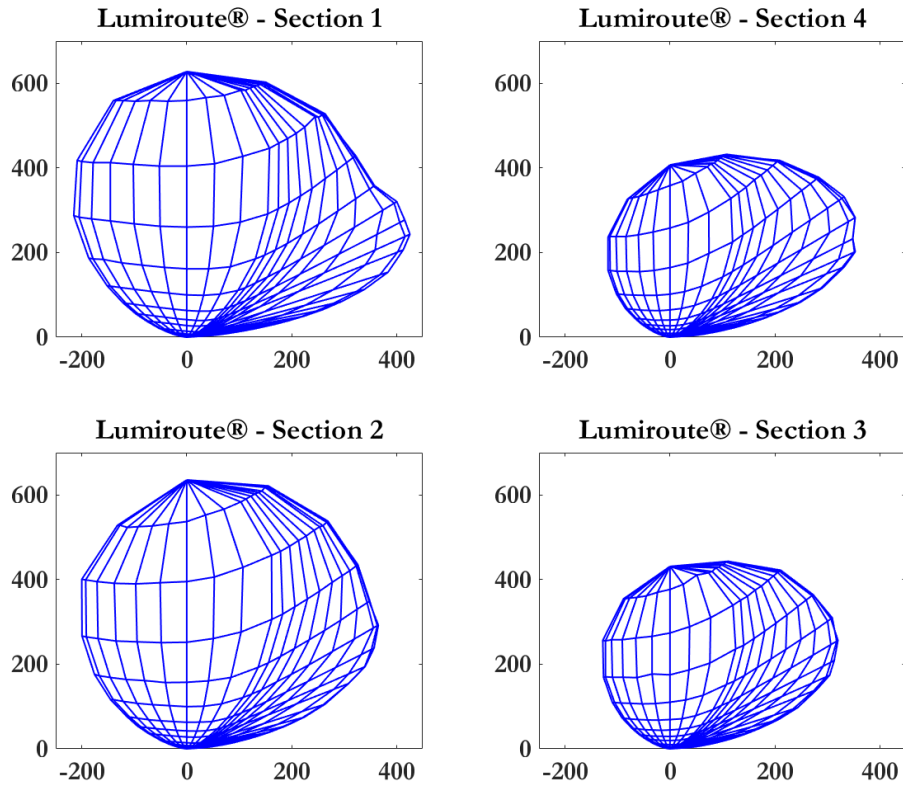


FIGURE 3.5 – Solides photométriques des revêtements du site expérimental Lumiroute®.

double, l'espacement de 30 m entre les luminaires est le même pour toutes les sections. Les quatre combinaisons de revêtement routier et d'éclairage sont résumées ci-dessous :

- La section 1 est composée de la surface de la route Lumiroute® 1 (surface brute avec des granulats de couleur claire, un liant synthétique et un pigment blanc TiO_2) combinée à un éclairage LED de 77 W (lampe STYLED, température de couleur 4000 K) avec un flux de 3500 lumens.
- La section 2 est composée de la surface de la route Lumiroute® 2 (surface de la route traitée au jet d'eau avec des granulats clairs et un liant bitumineux) combinée à un éclairage LED de 103 W (lampe STYLED, température de couleur 4000 K) avec un flux de 4600 lumens.
- La section 3 est composée d'une surface de route de contrôle traitée (surface de la route traitée au jet d'eau avec des granulats gris et un liant bitumineux) combinée à un éclairage traditionnel constitué d'une source à décharge aux halogénures métalliques de 140 W (lampe COSMO, température de couleur de 2811 K) avec un flux

de 7837,5 lumens.

- La section 4 est composée d'une surface de route de contrôle brute (surface de la route sans traitement avec des granulats gris et un liant bitumineux) combinée à la même source à décharge aux halogénures métalliques de 140 W avec un flux de 7837,5 lumens.

Pour chacune des quatre sections, la luminance moyenne, les uniformités générale et longitudinale de luminance et le *threshold increment* sont calculés pour un observateur en milieu de voie lente et un en milieu de voie rapide. On considère un facteur de maintenance de 0,9 pour les LED des sections 1 et 2 et un facteur de maintenance de 0,8 pour l'éclairage des sections 3 et 4. Le Tableau 3.7 résume les résultats obtenus pour chaque section avec les trois méthodes de représentation du revêtement.

On se concentre tout d'abord sur la luminance moyenne puisque la plupart du temps c'est la valeur qu'on cherche à atteindre en premier lors d'un dimensionnement d'éclairage. On remarque qu'en estimant les performances des quatre sections à l'aide d'une table-*r* standard, on sous-estime toujours la luminance moyenne d'au moins 10 %. On atteint même 38 % d'écart pour la section 1 ce qui rejoint les conclusions de Chain et al. (2007) qui annonçaient des erreurs de plus de 30 % sur la luminance moyenne avec l'utilisation des tables-*r* standards. Au contraire, lorsqu'on utilise une table-*r* standard normalisée par Q_0 , on a plutôt tendance à sur-estimer la luminance moyenne. Cela pose problème. En effet, si nous prenons le cas de la classe d'éclairage M3, on cherche à avoir une luminance moyenne de 1,00 cd.m⁻² sur la chaussée. Or, si on regarde la section 1, en simulant le dimensionnement avec la table-*r* normalisée par Q_0 et les flux actuels des luminaires, les niveaux de luminance sont atteints et nous considérons l'installation d'éclairage comme correcte. En réalité, avec le revêtement en place, la luminance moyenne est inférieure à 1,00 cd.m⁻² et les flux nécessitent donc d'être augmentés. Par contre, lorsqu'on s'intéresse à la section 2, si l'on dimensionne avec la table-*r* standard R2, on conclut qu'il faut modifier les paramètres de l'installation d'éclairage car la luminance moyenne n'est pas suffisante alors qu'en réalité, elle l'est. Si on avait dimensionné avec la table-*r* standard normalisée par Q_0 alors on aurait pu faire le choix de diminuer le flux ce qui aurait pu rendre l'installation non conforme.

		Section 1			Section 2			
		Table- <i>r</i> réelle	Table- <i>r</i> standard	Table- <i>r</i> normalisée	Table- <i>r</i> réelle	Table- <i>r</i> standard	Table- <i>r</i> normalisée	
Observateur 1	L_{moy}	0,90	0,56	-38 %	1,04	16 %	1,07	-35 %
	U_0	0,52	0,61	17 %	0,61	17 %	0,57	9 %
	U_l	0,82	0,81	-1 %	0,81	-1 %	0,82	-3 %
	f_{TI}	4,0	5,8	45 %	3,5	-13 %	4,6	7 %
Observateur 2	L_{moy}	0,97	0,60	-38 %	1,10	13 %	1,13	-34 %
	U_0	0,51	0,61	19 %	0,61	19 %	0,58	7 %
	U_l	0,76	0,86	13 %	0,86	13 %	0,81	7 %
	f_{TI}	3,1	4,6	47 %	2,8	-9 %	3,6	39 %

		Section 3			Section 4			
		Table- <i>r</i> réelle	Table- <i>r</i> standard	Table- <i>r</i> normalisée	Table- <i>r</i> réelle	Table- <i>r</i> standard	Table- <i>r</i> normalisée	
Observateur 1	L_{moy}	0,85	0,74	-14 %	0,98	15 %	0,89	-23 %
	U_0	0,65	0,72	10 %	0,72	10 %	0,61	3 %
	U_l	0,73	0,73	0 %	0,73	0 %	0,79	8 %
	f_{TI}	8,6	9,7	12 %	7,7	-11 %	8,4	23 %
Observateur 2	L_{moy}	0,92	0,79	-15 %	1,05	14 %	0,98	-23 %
	U_0	0,66	0,69	6 %	0,69	6 %	0,62	-1 %
	U_l	0,79	0,84	6 %	0,84	6 %	0,82	9 %
	f_{TI}	7,4	8,4	13 %	6,7	-10 %	7,1	22 %

TABLEAU 3.7 – Résultats des simulations d'estimation des performances des installations d'éclairage des 4 sections du site expérimental Lumiroute® pour un observateur en voie rapide (Observateur 1) et en voie lente (Observateur 2). En bleu, on utilise la table-*r* réelle du revêtement ; en rouge-orangé, la table-*r* standard correspondante ; en jaune, la table-*r* standard normalisée par Q_0 . On donne les écarts relatifs (en pourcentage) en prenant pour référence les valeurs obtenues en utilisant la table-*r* réelle.

Par ailleurs, si l'on observe les uniformités de luminance et le *threshold increment*, on remarque également que le choix de la méthode de considération du revêtement influe sur les niveaux atteints. Cependant, en se référant à la classe M3 qui demande d'atteindre $U_0 = 0,40$, $U_l = 0,60$ et $f_{TI_{max}} = 15 \%$, on voit dans le tableau 3.7 que les niveaux cibles sont satisfaits pour toutes les sections quelle que soit la méthode de prise en compte du revêtement.

Pour finir, en comparant les résultats obtenus pour les sections 3 et 4, on observe un léger effet du revêtement. De fait, les deux sections sont dimensionnées de la même façon à la seule différence du revêtement utilisé mais les performances diffèrent. La section 4 obtient des luminances moyennes plus élevées mais des uniformités et un *threshold increment* plus faibles. Le supplément de luminance peut s'expliquer par son coefficient de clarté légèrement supérieur et l'abaissement des uniformités par son caractère plus spéculaire que le revêtement de la section 3 (Sørensen, 1974).

3.3 Ajout d'un critère de visibilité

Pour aller plus loin que les grandeurs photométriques classiques (luminance moyenne, uniformités générale et longitudinale, *threshold increment*), à notre avis, un calcul de visibilité est un complément nécessaire, d'autant plus que l'une des principales fonctions de l'éclairage est de rendre visible un obstacle sur la route et de permettre ainsi à un usager de l'éviter. Nous proposons d'utiliser le modèle de visibilité d'Adrian bien connu pour les applications d'éclairage routier, modèle qui a été inclus dans les documents CIE il y a quelques années, puis retiré.

3.3.1 Le modèle de niveau de visibilité d'Adrian

De 1972 à 2010, un critère supplémentaire à ceux spécifiés dans les exigences de performance de la CIE a été utilisé : le niveau de visibilité (VL). Nous nous concentrerons sur le modèle d'Adrian qui l'a adapté pour des applications routières afin de caractériser une installation d'éclairage (Adrian, 1987, 1989).

Le modèle de calcul de visibilité présenté par Adrian (1989) s'appuie sur les recherches en laboratoire de Blackwell et Aulhorn ainsi que sur les siennes (Blackwell, 1946; Aulhorn, 1964; Adrian, 1969). Il traite de la détection d'une cible avec une probabilité $p = 99,93 \%$.

Il définit le VL comme le rapport du contraste réel C d'une cible avec son arrière-plan sur un contraste correspondant au seuil de visibilité C_{th} (cf. Équation 3.1).

$$VL = \frac{C}{C_{th}} = \frac{\Delta L}{\Delta L_{th}} \quad (3.1)$$

où ΔL est la différence de luminance réelle (en cd.m^{-2}) et ΔL_{th} est la différence de luminance seuil (en cd.m^{-2}).

Le calcul de la différence de luminance seuil est basé sur deux lois : celle de Ricco et celle de Weber⁴ (cf. Équation 3.2).

$$\Delta L_{th} = 2,6 \left(\frac{\Phi^{\frac{1}{2}}}{s_{ang}} + L^{\frac{1}{2}} \right)^2 \times AF \times TF \times F_{CP} \quad (3.2)$$

s_{ang} est la taille angulaire de la cible en minutes d'arc, Φ est une fonction de flux lumineux qui détermine la détection, caractéristique du processus de Ricco, L est une fonction de la luminance, traduisant la loi de Weber. Adrian a également utilisé des facteurs pour prendre en compte l'impact de l'âge de l'observateur (AF), le temps d'observation (TF) et la polarité du contraste (F_{CP}) sur la visibilité d'une cible sur une chaussée éclairée. De plus, il a remplacé la luminance de fond par une luminance d'adaptation pour tenir compte de la présence de sources d'éblouissement dans le champ visuel. Ainsi L_f devient $L_a = L_f + L_v$ dans les équations où L_f est la luminance de fond, L_v la luminance de voile équivalente et L_a la luminance d'adaptation.

Adrian (1989) détaille le calcul de chacun des facteurs. Afin d'illustrer les étapes de ce calcul, on choisit une situation de référence pour laquelle on donnera les résultats à chaque étape. On cherche à déterminer le niveau de visibilité d'une cible de 25 cm de diamètre vue à 76,5 m par un conducteur de 23 ans. Le temps d'observation est considéré égal à 0,2 s qui peut être considéré comme le temps d'une fixation oculaire en conduite (Boyce, 2014). La cible a une luminance de 0,4 cd.m^{-2} et son fond 0,6 cd.m^{-2} . Les sources de lumière provoquent une luminance de voile équivalente à 0,07 cd.m^{-2} . On peut déjà en déduire la taille angulaire de la cible $s_{ang} = 11,23$ min d'arc et la luminance d'adaptation $L_a = 0,67$ cd.m^{-2} .

4. La loi de Weber dit que, pour des cibles de grande dimension, la sensibilité relative au stimulus est constante. Lorsque la taille de la cible diminue jusqu'à une limite, la sensibilité relative augmente comme le carré de sa taille angulaire (loi de Ricco).

Tout d'abord, Adrian (1989) donne les Équations 3.4, 3.5 et 3.6 pour calculer les fonctions $\Phi^{\frac{1}{2}}$ et $L^{\frac{1}{2}}$ et en déduire la différence de luminance seuil $\Delta L_{pos,t=2}$ (cf. Équation 3.3). Pour notre cas d'étude, on obtient $\Phi^{\frac{1}{2}} = 0,7285$ et $L^{\frac{1}{2}} = 0,0493$ ce qui donne $\Delta L_{pos,t=2} = 0,0339 \text{ cd.m}^{-2}$.

$$\Delta L_{pos,t=2} = 2,6 \left(\frac{\Phi^{\frac{1}{2}}}{s_{ang}} + L^{\frac{1}{2}} \right)^2 \quad (3.3)$$

— Pour $L_a \geq 0,6 \text{ cd.m}^{-2}$

$$\begin{cases} \Phi^{\frac{1}{2}} = \log(4,1925 L_a^{0,1556}) + 0,1684 L_a^{0,5867} \\ L^{\frac{1}{2}} = 0,05946 L_a^{0,466} \end{cases} \quad (3.4)$$

— Pour $L_a \leq 0,00418 \text{ cd.m}^{-2}$

$$\begin{cases} \log \Phi^{\frac{1}{2}} = 0,028 + 0,173 \log L_a \\ \log L^{\frac{1}{2}} = -0,891 + 0,5275 \log L_a + 0,0227 (\log L_a)^2 \end{cases} \quad (3.5)$$

— Pour $0,00418 \text{ cd.m}^{-2} < L_a < 0,6 \text{ cd.m}^{-2}$

$$\begin{cases} \log \Phi^{\frac{1}{2}} = -0,072 + 0,3372 \log L_a + 0,0866 (\log L_a)^2 \\ \log L^{\frac{1}{2}} = -1,256 + 0,319 \log L_a \end{cases} \quad (3.6)$$

Les données sur lesquelles Adrian s'est appuyé pour développer son modèle de visibilité ont été trouvées pour un temps d'observation de 2 secondes ou bien un temps illimité. Afin d'adapter son modèle à des temps d'exposition plus court, il introduit le facteur TF qui équivaut à :

$$TF = \frac{a(s_{ang}, L_a) + t}{t} \quad (3.7)$$

avec a qui est une fonction qui dépend de la taille angulaire de la cible s_{ang} et du niveau de luminance L_a (cf. Équations 3.8⁵, 3.9 et 3.10). Pour notre exemple, nous obtenons $a(s_{ang}) = 0,1765$ et $a(L_a) = 0,1938$, ce qui donne $a(s_{ang}, L_a) = 0,1248$ et donc $TF = 1,6241$.

$$a(s_{ang}, L_a) = \frac{(a(s_{ang})^2 + a(L_a)^2)^{\frac{1}{2}}}{2,1} \quad (3.8)$$

5. L'Équation 3.8 est donnée pour des cibles de taille $s_{ang} < 60 \text{ min d'arc}$.

$$a(s_{ang}) = 0,36 - 0,0972 \times \left(\frac{(\log s_{ang} + 0,523)^2}{(\log s_{ang} + 0,523)^2 - 2,513(\log s_{ang} + 0,523) + 2,7895} \right) \quad (3.9)$$

$$a(L_a) = 0,355 - 0,1217 \times \left(\frac{(\log L_a + 6)^2}{(\log L_a + 6)^2 - 10,4(\log L_a + 6) + 52,28} \right) \quad (3.10)$$

Par ailleurs, les mesures de référence n'ont été réalisées que pour des cibles vues en contraste positif. Or, nous avons vu dans le chapitre 2 qu'une cible en contraste négatif est mieux vue qu'en contraste positif (Hills, 1975b). Pour prendre en compte la différence de ΔL entre contraste positif et négatif, Adrian introduit un facteur de polarité de contraste F_{CP} , obtenu d'après les données d'Aulhorn (1964) (cf. Équations 3.11, 3.12 et 3.13). Ce facteur est égal à 1 si le contraste est positif. Dans notre exemple, la différence de luminance est négative. On a $\beta = 0,6368$ et $m = 0,1673$ ce qui nous donne un facteur de polarité de contraste $F_{CP} = 0,5596$.

$$F_{CP}(s_{ang}, L_a) = 1 - \frac{ms_{ang}^{-\beta}}{2,4 \Delta L_{pos,t=2}} \quad (3.11)$$

avec :

$$\beta = 0,6L_a^{-0,1488} \quad (3.12)$$

et

$$m = \begin{cases} 10^{-10^{-(0,125(\log L_a + 1)^2 + 0,0245)}} & \text{pour } L_a \geq 0,1 \text{ cd.m}^{-2} \\ 10^{-10^{-(0,075(\log L_a + 1)^2 + 0,0245)}} & \text{pour } 0,004 \text{ cd.m}^{-2} < L_a < 0,1 \text{ cd.m}^{-2} \end{cases} \quad (3.13)$$

Enfin, pour prendre en compte la diminution de transmission oculaire avec l'âge, Adrian ajoute un facteur d'âge AF qu'il définit comme suit :

$$AF = \begin{cases} \frac{(\hat{\text{Age}} - 19)^2}{2160} + 0,99 & \text{pour } 23 \text{ ans} < \hat{\text{Age}} < 64 \text{ ans} \\ \frac{(\hat{\text{Age}} - 56,5)^2}{116,3} + 1,43 & \text{pour } 64 \text{ ans} < \hat{\text{Age}} < 75 \text{ ans} \end{cases} \quad (3.14)$$

Comme nous considérons un conducteur de 23 ans, on a $AF = 0,9974$. On en déduit alors la différence de luminance seuil $\Delta L_{th} = 0,0307 \text{ cd.m}^{-2}$ et on trouve un niveau de

visibilité de notre cible selon Adrian égal à $VL = -6,50$. Si l'on compare le VL obtenu au seuil de 7, faisant référence à différentes études sur le niveau seuil de visibilité en conduite nocturne (Adrian, 1989; Lecocq, 1991; Buyukkinaci et al., 2018), on en déduit que notre cible n'est probablement pas assez visible du point de vue du conducteur.

3.3.2 Mise en œuvre du calcul du niveau de visibilité d'Adrian

Le logiciel auparavant développé est complété pour intégrer le calcul du VL selon Adrian (1989). Pour cela, une cible carrée est placée verticalement en chaque point de la grille de calcul normalisée (cf. Figure 2.14). La cible mesure $25\text{ cm} \times 25\text{ cm}$ et a une réflectance diffuse de 20 %. Ce choix n'est pas fait de manière anodine. En effet, dans son étude, Adrian traite de la détection d'une cible de taille angulaire égale à 10 min d'arc. Or, en éclairage routier, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, le conducteur est considéré comme regardant le sol avec un angle de 1° sous l'horizontale ce qui équivaut à regarder à 86 m devant lui. Pour simuler l'observation d'un objet ayant pour taille angulaire 10 min d'arc, il faut donc que cet objet fasse 25 cm de côté. Concernant la réflectance de la cible, on choisit de reprendre la valeur qui était déjà recommandée par la CIE lorsque le modèle de visibilité était encore prescrit et qui faisant référence à des mesures de facteurs de réflexion des vêtements de piétons, c'est-à-dire 20 % (CIE, 1995).

Pour la conception des installations d'éclairage routier, l'âge de l'observateur est conventionnellement pris comme étant de 23 ans. On considérera donc $\hat{\text{Age}} = 23$ dans toutes les simulations qui suivront. Le calcul du VL d'Adrian est alors mis en œuvre et les performances en terme de visibilité de chaque section du site expérimental Lumiroute® sont évaluées. Auparavant, plusieurs approfondissements ont été discutés pour l'implémentation de ce calcul et sont décrites ci-après.

3.3.2.1 Ombre

Tout d'abord, pour correspondre au mieux à la réalité (cf. Figure 3.6, à gauche), l'ombre des cibles due à chaque luminaire est simulée. Pour cela, pour un luminaire et une position de cible donnés, on calcule les intersections avec le sol des droites passant par le centre du luminaire et chacun des quatre coins de la cible.

Soit $\vec{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ les coordonnées du centre du luminaire et $\vec{r}_1 = (x_1, y_1, z_1)$ les coordonnées d'un des coins de la cible, on définit la droite passant par le centre du luminaire

et le coin de la cible selon l'Équation 3.15.

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + t\vec{d} \quad (3.15)$$

où t est un paramètre avec une valeur unique en chaque point de la droite et \vec{d} le vecteur directeur de la droite défini par l'Équation 3.16.

$$\vec{d} = \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_0}{\|\vec{r}_1 - \vec{r}_0\|} \quad (3.16)$$

On définit également l'équation vectorielle de la surface de la route comme étant $\vec{n} \cdot \vec{r}' = 0$ avec $\vec{n} = (0, 0, 1)$ la normale au plan. Au point d'intersection, les vecteurs positions de la droite et du plan sont égaux. On a donc $\vec{r}' = \vec{r}$ et on trouve la valeur de t avec l'Équation 3.17.

$$t = \frac{-\vec{n} \cdot \vec{r}_0}{\vec{n} \cdot \vec{d}} \quad (3.17)$$

Les coordonnées du point d'intersection \vec{p} sont alors obtenues en remplaçant t par sa valeur dans l'Équation 3.15.

Ainsi, en calculant le point d'intersection pour chacun des coins de la cible, on obtient un polygone à quatre côtés sur la surface routière dans lequel la contribution du luminaire sera considérée comme nulle (Figure 3.6). On renouvelle l'opération pour chaque luminaire et on obtient finalement un éclairage total sur le revêtement prenant en compte l'ombre dû à chacun des luminaires. Cette prise en compte de l'ombre peut notamment avoir un effet sur le contraste de la cible avec son fond puisqu'elle modifie la luminance du sol considéré comme le fond.

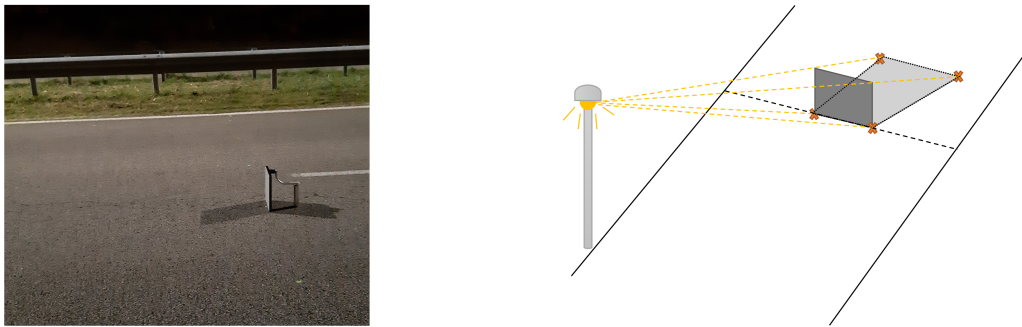


FIGURE 3.6 – À gauche : Photo montrant l'ombre de la cible provoquée par les luminaires. À droite : Schéma de l'ombre de la cible provoquée par un luminaire.

3.3.2.2 Luminance de fond

Pour la luminance de fond, on décide d'utiliser la luminance du côté de la cible qui maximise le contraste car il a été montré dans une comparaison entre le calcul du contraste et l'efficacité dans une tâche de détection humaine qu'elle est mieux corrélée aux performances de détection de la cible (Brémond et al., 2011; Buyukkinaci et al., 2019).

On calcule donc la luminance de fond en quatre points correspondants aux côtés de la cible vus par l'observateur. Pour connaître les coordonnées de ces quatre points, on cherche à retrouver les positions des projections sur le sol des centres des ellipses de 2' d'arc provenant des yeux de l'observateur et qui sont tangentes aux côtés de la cible (cf. Figure 3.7). Une taille angulaire de 2' d'arc est choisi car cela correspond au pouvoir séparateur de l'œil humain la nuit (CIE, 2021).

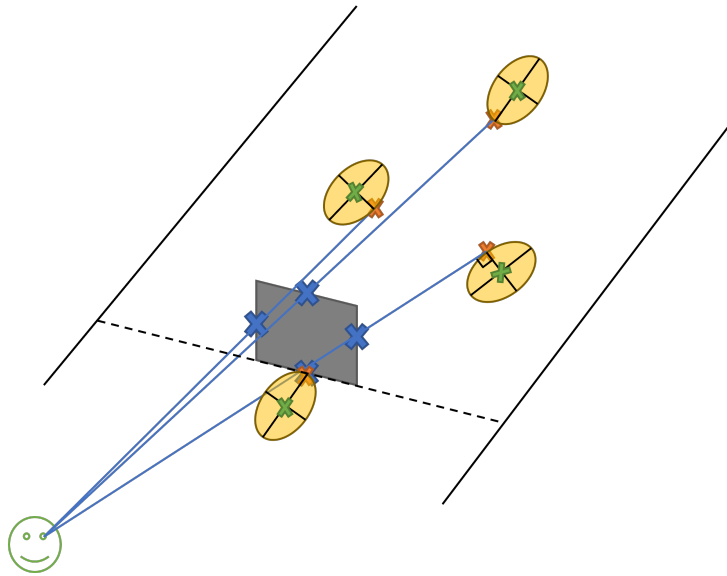


FIGURE 3.7 – Positionnement de l'ellipse aux quatre positions à comparer pour la luminance de fond (croix vertes). Les croix bleues correspondent aux milieux des côtés de la cible, les croix rouges à leurs projections sur le sol et les croix vertes correspondent aux centres des ellipses de 2 min d'arc qui sont tangentes aux croix rouges.

La méthode suivante est utilisée. Tout d'abord, on trouve les coordonnées du centre de l'ellipse qui est tangente au milieu du côté de la cible. On donne un exemple pour la luminance de fond gauche sur la Figure 3.8.

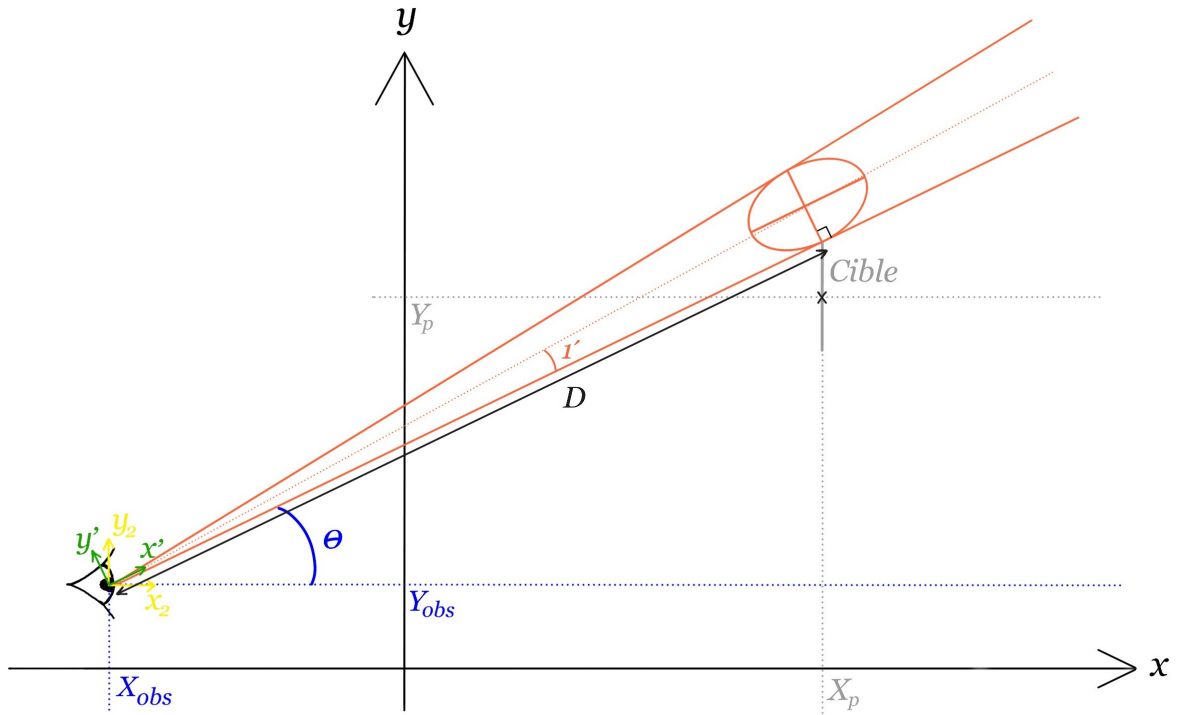


FIGURE 3.8 – Schéma de définition de l'ellipse de 2 min d'arc permettant le calcul de la luminance de fond.

Soit D la distance au sol entre l'observateur et le côté gauche de la cible. Dans le repère (x', y') en vert, les coordonnées du centre de l'ellipse sont :

$$\begin{cases} X' = D = \sqrt{(X_p - X_{obs})^2 + (Y_p - Y_{obs} + \frac{TailleCible}{2})^2} \\ Y' = D \tan(1') \end{cases} \quad (3.18)$$

On exprime ensuite ces coordonnées dans le repère (x_2, y_2) de l'observateur en jaune.

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} (R) \quad (3.19)$$

où $(R) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ est la matrice de rotation pour passer du repère (x', y') au

repère (x_2, y_2) et

$$\theta = \arctan\left(\frac{Y_p - Y_{obs} + \frac{TailleCible}{2}}{X_p - X_{obs}}\right). \quad (3.20)$$

On obtient ainsi :

$$\begin{cases} X_2 = D \cos \theta - D \tan(1') \sin \theta \\ Y_2 = D \sin \theta + D \tan(1') \cos \theta \end{cases} \quad (3.21)$$

Enfin, on repasse dans le repère principal (x, y) et les coordonnées du centre de l'ellipse deviennent :

$$\begin{cases} X = X_{obs} + D(\cos \theta - \tan(1') \sin \theta) \\ Y = Y_{obs} + D(\sin \theta + \tan(1') \cos \theta) \end{cases} \quad (3.22)$$

Il suffit ensuite de trouver le point d'intersection entre le sol et la droite provenant des yeux de l'observateur et passant par le centre de l'ellipse. Pour cela, on reprend les Équations 3.15, 3.16 et 3.17 en remplaçant \vec{r}_0 par les coordonnées de l'observateur et \vec{r}_1 par les coordonnées du centre de l'ellipse que l'on vient de calculer. On donne ci-après les coordonnées des centres des ellipses pour les quatre côtés de la cible.

Pour le côté gauche, on a donc

$$\begin{cases} X = X_{obs} + D(\cos \theta - \tan(1') \sin \theta) \\ Y = Y_{obs} + D(\sin \theta + \tan(1') \cos \theta) \\ Z = \frac{TailleCible}{2} \end{cases} \quad (3.23)$$

avec D et θ définis dans les Équations 3.18 et 3.20.

Pour le côté droit, les coordonnées du centre de l'ellipse sont :

$$\begin{cases} X = X_{obs} + D(\cos \theta + \tan(1') \sin \theta) \\ Y = Y_{obs} + D(\sin \theta - \tan(1') \cos \theta) \\ Z = \frac{TailleCible}{2} \end{cases} \quad (3.24)$$

avec

$$D = \sqrt{(X_p - X_{obs})^2 + \left(Y_p - Y_{obs} - \frac{TailleCible}{2}\right)^2} \quad (3.25)$$

et

$$\theta = \arctan\left(\frac{Y_p - Y_{obs} - \frac{TailleCible}{2}}{X_p - X_{obs}}\right). \quad (3.26)$$

Pour le côté en haut de la cible, le centre de l'ellipse est défini par :

$$\begin{cases} X = X_p \\ Y = Y_p \\ Z = Z_{obs} - D \tan(\theta - 1') \end{cases} \quad (3.27)$$

avec

$$D = \sqrt{(X_p - X_{obs})^2 + (Y_p - Y_{obs})^2} \quad (3.28)$$

et

$$\theta = \arctan\left(\frac{Z_{obs} - TailleCible}{D}\right). \quad (3.29)$$

Enfin, le centre de l'ellipse tangente au bas de la cible est donné par :

$$\begin{cases} X = X_p \\ Y = Y_p \\ Z = Z_{obs} - D \tan(\theta + 1') \end{cases} \quad (3.30)$$

avec D défini dans l'Équation 3.28 et

$$\theta = \arctan\left(\frac{Z_{obs}}{D}\right). \quad (3.31)$$

3.3.2.3 Luminance d'adaptation

Aussi, concernant la luminance d'adaptation, la question se pose de comment la considérer. Dans leur article, Brémond et al. (2011) comparent deux approches pour estimer la luminance d'adaptation : soit égale à la luminance de fond (donc variable d'une cible à l'autre) soit égale à la luminance moyenne de la chaussée. Il ressort de cette étude une meilleure corrélation entre la distance de détection d'une cible et son VL lorsqu'une valeur unique de luminance d'adaptation est utilisée. De plus, la luminance d'adaptation représente l'ajustement du SVH à la luminosité de la scène regardée. L'oeil se règle donc sur la moyenne des luminances présentes dans la portion du champ de vision mobilisé par la tâche effectuée. Nous avons donc raisonné de manière globale et avons considéré la

luminance d’adaptation comme étant la somme de la luminance moyenne du maillage et de la luminance de voile utilisée dans le calcul du *threshold increment*.

3.3.2.4 Taille angulaire

Enfin, le calcul de la différence de luminance seuil dépend de la taille angulaire de la cible s_{ang} . Pour chaque position de la cible, nous avons décidé de prendre la taille angulaire de la cible comme étant égale à la moyenne des tailles angulaires obtenues en largeur et en hauteur du point de vue de l’observateur.

3.3.2.5 Simulation du VL sur le site Lumiroute®

Le modèle de niveau de visibilité d’Adrian est mis en œuvre pour les quatre sections Lumiroute® décrites dans la section 3.2. Pour chaque section, on donne la moyenne, le minimum et le maximum des VL calculés pour les 60 points de la grille normalisée (cf. Tableau 3.8). On fournit également le pourcentage de cibles considérées comme visible, c’est-à-dire avec un VL supérieur à 7.

Section	Observateur	$ VL _{moy}$	$ VL _{min}$	$ VL _{max}$	$ VL > 7$
1	Voie 1	18,76	5,96	40,27	96,67 %
	Voie 2	20,60	7,64	41,78	100,00 %
2	Voie 1	19,11	7,14	33,41	100,00 %
	Voie 2	20,31	8,42	34,50	100,00 %
3	Voie 1	14,36	2,08	26,32	88,33 %
	Voie 2	15,91	3,13	26,64	93,33 %
4	Voie 1	14,70	1,78	29,49	86,67 %
	Voie 2	16,57	3,23	29,74	93,33 %

TABLEAU 3.8 – Calculs de visibilité tenant compte uniquement de l’éclairage direct pour chaque section du site expérimental Lumiroute® lorsque l’observateur se trouve sur la voie rapide (voie 1) ou sur la voie lente (voie 2).

D’ores et déjà, on observe des différences entre les sections. En moyenne, le VL est moins élevé pour les sections 3 et 4 que pour les sections 1 et 2. De même, on retrouve des valeurs plus grandes pour les deux premières sections lorsqu’on observe les VL minimaux et maximaux. Si on compare la section 1 et la section 4 qui ont des performances en terme de luminance globalement similaires (cf. Tableau 3.7) mis à part pour l’uniformité

générale (la section 4 a de meilleures uniformités), on voit que les $|VL|_{min}$ sont nettement inférieurs pour la section 4 et que les $|VL|_{max}$ sont eux très supérieurs pour la section 1.

Cependant, si on se réfère au seuil de 7 comme étant un critère de visibilité, ces trois premières métriques que sont $|VL|_{moy}$, $|VL|_{min}$ et $|VL|_{max}$ ne nous donnent pas d'information quant à la distribution de la visibilité sur la chaussée dans sa totalité. En effet, le $|VL|_{moy}$ peut par exemple se retrouver supérieur à 7 alors que la moitié des VL y sont inférieurs. Si on se rapportait seulement à ce critère, on pourrait alors dire que l'éclairage est correctement dimensionné pour apporter suffisamment de visibilité aux usagers alors que la moitié de la chaussée comporterait des zones d'invisibilité. De même, le $|VL|_{min}$ peut nous renseigner sur la présence ou non de zones d'invisibilité mais pas sur son nombre. Si on prend l'exemple de la section 4 avec l'observateur placé en voie 2, on a $|VL|_{min} = 3, 23$. On sait alors qu'au moins une cible sur les soixante est évaluée comme non visible. De même, avec la valeur de $|VL|_{max}$, on sait qu'au moins une cible est visible. Cependant, on ne sait pas le nombre de cibles qui ne sont pas visibles. On pourrait très bien avoir 30 cibles invisibles avec un $VL = 3, 23$ et 30 cibles visibles avec un $VL = 29, 74$ ce qui nous donnerait un $VL_{moy} = 16, 49$, proche de celui calculé ici.

Cela pose des problèmes de sécurité, c'est pourquoi nous avons choisi d'évaluer le pourcentage de cibles visibles, c'est-à-dire avec $|VL| > 7$. Cette métrique nous renseigne sur la visibilité de toute la chaussée et notamment sur son homogénéité. Si on reprend l'exemple de la section 4, voie 2, on observe qu'en fait 93,33 % des cibles sont considérées comme visible soit 56 cibles sur 60. Ce résultat est plus satisfaisant que l'hypothèse que nous avons fait en utilisant les trois premières métriques. Par ailleurs, si on compare les sections 3 et 4 en regardant ces trois métriques, on pourrait penser que la section 3 a de moins bonnes performances en terme de visibilité que la section 4 alors qu'on observe qu'elle a plus de cibles visibles si on se rapporte au pourcentage de $|VL| > 7$. On décide donc que le pourcentage de cibles visibles sera le critère utilisé dans la suite pour évaluer les performances d'une installation d'éclairage du point de vue de la visibilité.

3.3.3 Ajout des réflexions de la lumière sur la surface de la route

Le VL précédemment simulé est calculé en tenant compte uniquement de l'éclairement direct (cf. Figure 3.9). Cependant, en réalité, la luminance de la cible est le résultat de deux composantes : la lumière directe provenant des luminaires et la lumière réfléchi

par la surface de la route devant la cible (cf. Figure 3.9). Afin d'étudier l'influence de la surface de la route sur la visibilité de la cible, nous complétons notre méthode de calcul en tenant compte de l'éclairage indirect dû à la lumière qui arrive sur la cible après réflexion sur la surface de la route.



FIGURE 3.9 – A gauche : Sources de la luminance de la cible. A droite : Géométrie pour le calcul de l'éclairage cible indirect (*Source : Manuscrit de thèse de Gibbons (1998)*).

3.3.3.1 Calcul de l'éclairage réfléchi arrivant sur la cible

L'éclairage vertical global de la cible E_C est la somme d'une composante directe E_{CD} et d'une composante réfléchie E_{CR} (Équation 3.32).

$$E_C = E_{CD} + E_{CR} \quad (3.32)$$

Si on considère une petite partie de la surface de la route comme source d'émission de lumière, selon la géométrie illustrée à droite sur la Figure 3.9, l'éclairage réfléchi arrivant sur la cible est défini par l'Équation 3.33 (Gibbons, 1998).

$$E_{CR} = \frac{I_s}{D_T^2} \cos \alpha \cos \delta \quad (3.33)$$

où :

I_s est l'intensité émise par la surface de la route (en cd) ;

D_T est la distance entre la partie élémentaire de route et la cible (en mètres) ;

α est l'angle que fait la lumière réfléchie par la surface élémentaire vers le centre de la cible par rapport à la surface de la route (en °) ;

δ est l'angle de la lumière réfléchi par rapport à la normale de la surface élémentaire dans le plan de la surface routière (en $^\circ$).

L'intensité I_s de la lumière provenant de la portion de la route est alors :

$$I_s = L_s \times F \times \sin \alpha \quad (3.34)$$

où L_s est la luminance de la surface de la route (en cd.m^{-2}) et F est l'aire de la surface élémentaire (en m^2).

3.3.3.2 Zone d'intégration et nombre de surfaces élémentaires

Comme nous pouvons le voir dans les Équations 3.33 et 3.34, l'éclairement réfléchi arrivant sur la cible dépend de l'aire de la portion de route considérée et de sa distance à la cible. Pour obtenir l'éclairement total réfléchi sur la cible, toute la surface de la route devant la cible doit être intégrée. Cependant, comme l'éclairement réfléchi à une dépendance inverse au carré de la distance (cf. Équation 3.33), plus la surface est éloignée, moins elle contribue. Pour s'en convaincre, on a fixé la luminance de la chaussée à 1 cd.m^{-2} puis on a calculé la contribution à l'éclairement réfléchi de chaque surface élémentaire de trois portions de route de tailles différentes ($10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ et $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) divisées en 100×100 . Comme le montre la Figure 3.10, il n'est pas utile de considérer la totalité de la chaussée dans le calcul de l'éclairement réfléchi puisque la contribution à 5 m de la cible par exemple est quasi-nulle.

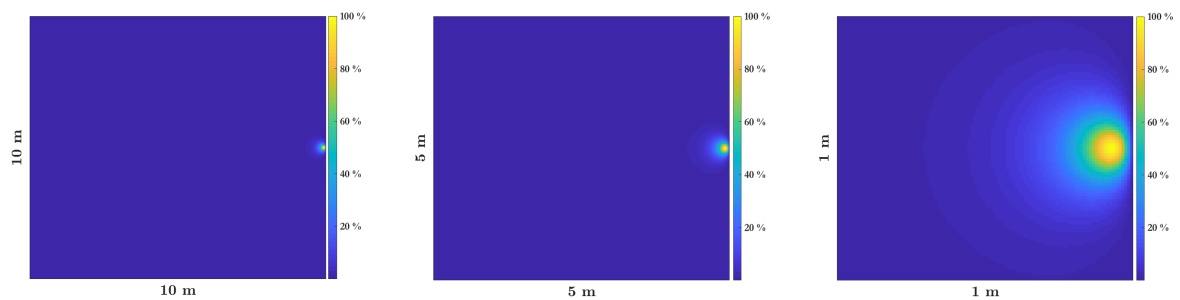


FIGURE 3.10 – Contribution normalisée de la surface du sol à l'éclairement réfléchi de la cible pour différentes tailles de zone d'intégration. La cible est située à droite.

Afin d'éviter d'avoir une zone d'intégration qui dépasse la largeur de la route, en particulier pour les points de mesure situés au bord de la voie, nous avons donc choisi une

zone d'intégration de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. Comme le montre la Figure 3.10, cette taille permet d'intégrer la quasi-totalité de la contribution du sol à l'éclairage réfléchi. De plus, une taille de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ équivaut à une surface de route intégrée qui fait seize fois la surface de la cible. Ceci est conforme aux suggestions de Gibbons (1998) dans sa thèse qui suggérait de considérer une superficie minimale de neuf fois la surface de la cible.

De plus, dans cette zone d'intégration, la distance et l'angle entre la surface de la route et la cible varient : il est donc nécessaire de définir des zones élémentaires. Pour fixer le nombre de surfaces élémentaires, nous avons étudié l'influence de ce paramètre sur l'éclairage réfléchi total. Pour cela, nous avons fixé la luminance de la route L_s à 1 cd.m^{-2} et nous avons évalué l'éclairage réfléchi total sur la cible en modifiant le nombre de surfaces élémentaires constituant la zone d'intégration de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. Ainsi, nous obtenons une courbe représentant l'éclairage réfléchi total en fonction du nombre de surfaces élémentaires considérées (cf. Figure 3.11). Comme la courbe atteint une valeur asymptotique, nous choisissons de couper la zone d'intégration en 20×20 surfaces élémentaires afin d'optimiser le temps de calcul.

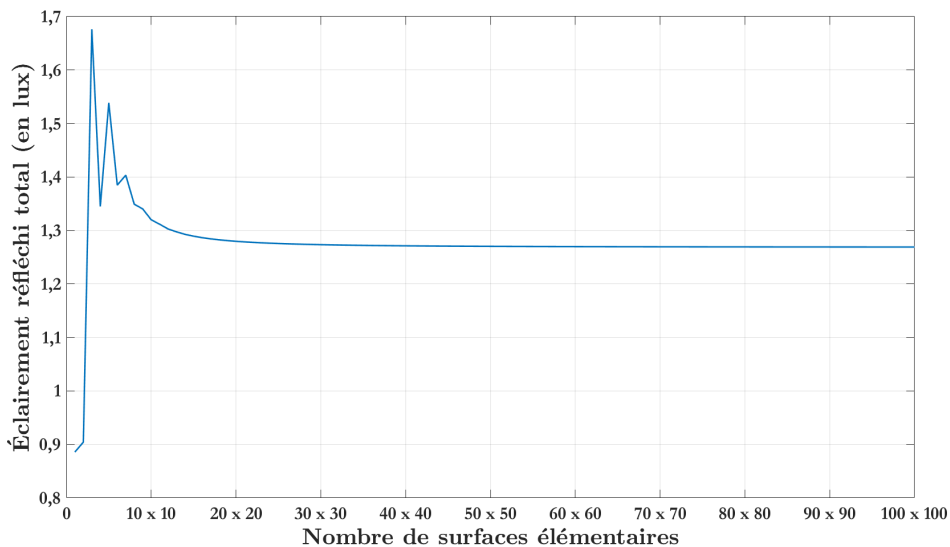


FIGURE 3.11 – Évolution de l'éclairage réfléchi total arrivant sur la cible en fonction du nombre de surfaces élémentaires considérées.

3.3.3.3 Interpolation et extrapolation des tables- r

Une fois la zone d'intégration et le nombre de surfaces élémentaires définis, il est nécessaire de considérer la photométrie de la surface de la route. En effet, le calcul de l'éclairement réfléchi sur la cible peut être effectué relativement facilement à l'exception d'une composante : la luminance de la surface de la route L_s . De fait, les mesures de réflectance de la surface de la route sont généralement basées sur un angle d'observation $\alpha = 1^\circ$. Cependant, la luminance d'une portion de route dépend de la géométrie entre la cible et cette portion (cf. Équation 3.35). Nous avons donc besoin de mesures de réflectance de la surface de la route pour des angles d'observation α variables (cf. Figure 3.12).

$$L_s = \frac{I(C, \gamma)}{H^2} r(\alpha, \beta, \gamma) \quad (3.35)$$

où :

$I(C, \gamma)$ est l'intensité lumineuse (en cd) dans la direction (C, γ) au point de calcul ;

H est la hauteur des luminaires au-dessus de la surface de la route (en mètres) ;

$r(\alpha, \beta, \gamma)$ est le coefficient de luminance réduit (en $\text{cd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$).

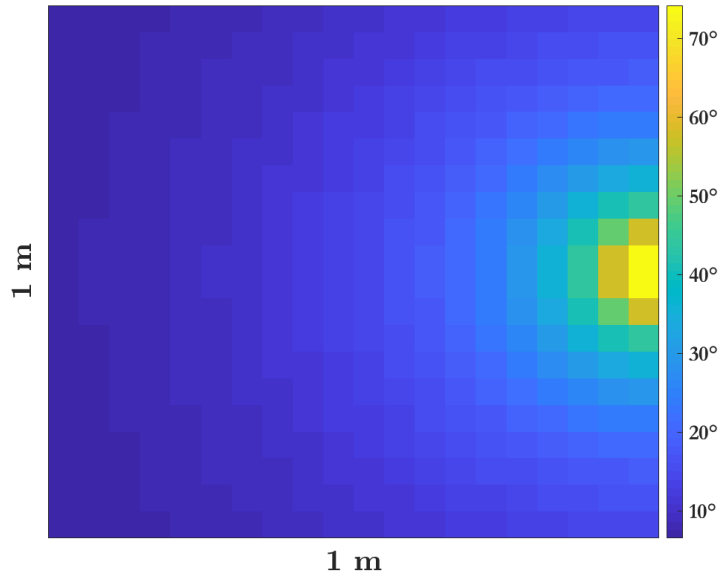


FIGURE 3.12 – Distribution des angles α entre la cible et les portions de route de la zone d'intégration.

Idéalement, nous aimerions avoir la fonction complète de distribution de réflectance bidirectionnelle (BRDF) de chaque revêtement routier pour connaître les valeurs de $r(\alpha, \beta, \gamma)$ correspondants à toutes les surfaces élémentaires considérées. Cependant, le goniorélectomètre du laboratoire Cerema peut mesurer les tables- r pour $\alpha = 1^\circ, 2, 29^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ et 45° . Une méthode permettant d'étendre ces données expérimentales à tous les angles d'observation est donc nécessaire pour retrouver les valeurs de $r(\alpha, \beta, \gamma)$ utiles au calcul de la luminance de surface L_s .

Deux méthodes ont été développées à cette fin. La première consiste à déterminer l'équation reliant les coefficients de clarté des tables- r aux angles d'observation avec lesquels elles ont été mesurées pour ensuite déterminer les tables- r à d'autres angles via une normalisation par Q_0 . La seconde approche utilise une méthode mathématique basée sur des angles relatifs et une stratégie des plus proches voisins pour déterminer les valeurs des coefficients q nécessaires. Les deux méthodes sont présentées ci-après puis comparées.

Méthode par ajustement logarithmique du Q_0

Afin d'effectuer des calculs de la lumière réfléchiée par la surface de la route à différents angles de réflexion α , deux cas doivent être pris en compte. Le premier est lorsque $\alpha \leq 45^\circ$ puisque nous disposons de tables- r pour des angles d'observation entre 1° et 45° . Dans ce cas, une simple interpolation linéaire est calculée par rapport à α . Lorsque $\alpha > 45^\circ$, une autre stratégie doit être trouvée.

Des mesures aux six angles d'observation du goniorélectomètre du Cerema ont été effectuées pour les quatre tronçons de route du site expérimental Lumiroute®. Les valeurs de Q_0 correspondantes sont représentées en fonction de l'angle d'observation sur la Figure 3.13. En supposant que la surface de la route a un comportement de plus en plus diffus lorsque l'angle d'observation augmente, on a remarqué qu'il est possible d'ajuster les valeurs de Q_0 en fonction de α avec un logarithme népérien selon l'Équation 3.36 (coefficients de corrélation supérieurs à 0,99) (cf. Figure 3.13).

$$Q_0 = a \times \ln(\alpha) + b \tag{3.36}$$

où a et b sont des coefficients obtenus par l'ajustement.

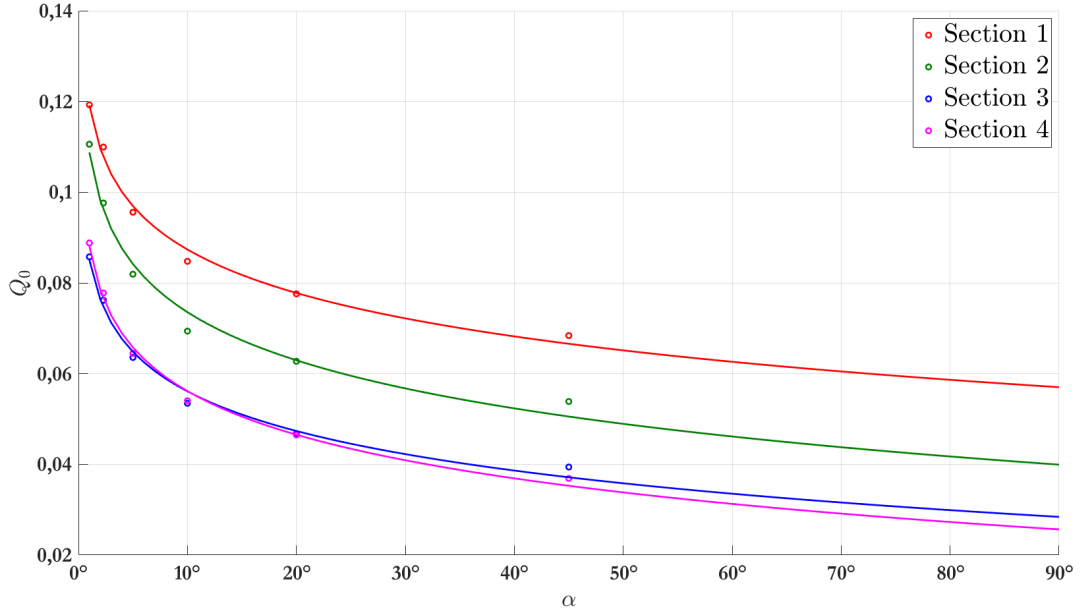


FIGURE 3.13 – Évolution de la clarté Q_0 de chaque section du site Lumiroute® en fonction de l'angle d'observation α . Les points 'o' correspondent aux Q_0 obtenus avec les six tables- r et les lignes représentent l'ajustement pour chaque section de route.

Une fois l'ajustement réalisé, la table- r obtenue pour $\alpha = 45^\circ$ est normalisée par Q_0 en utilisant les coefficients a et b . Ainsi, pour un angle d'observation quelconque $\alpha_i > 45^\circ$, on extrapole les coefficients de la table- r via l'Équation 3.37.

$$r(\alpha_i, \beta, \gamma) = \frac{a \times \ln(\alpha_i) + b}{a \times \ln(45^\circ) + b} \times r(45^\circ, \beta, \gamma) \quad (3.37)$$

Quelle que soit la stratégie utilisée pour l'angle d'observation, pour un couple (β, γ) non inclus dans les tables- r , une interpolation bilinéaire est effectuée comme expliqué dans la norme EN 13201 (CEN, 2015c).

Méthode par les plus proches voisins

Dans un second temps, une autre approche a été développée en s'appuyant plutôt sur des valeurs de q (Boucher et al., 2022). Pour cela, nous avons utilisé une BRDF de référence. Il a été remarqué que la BRDF atteint son maximum pour des angles d'observation α rasants, des angles d'incidence γ élevés, c'est-à-dire proches de 90° , et des petites valeurs d'angle β . Si l'on combine raisonnablement ces trois paramètres, on peut donc aboutir à

de nouvelles variables qui pourraient influencer les variations du coefficient de luminance q . De plus, cela permettrait d'augmenter la dimension du jeu de données. À partir de ce constat, on définit les « angles relatifs » $\gamma - \alpha$, $\beta - \alpha$ et $\beta - \gamma$ et on observe si ces nouvelles variables ont une influence non négligeable sur le coefficient de luminance q . Les corrélations linéaires de Pearson entre le coefficient de luminance q et toutes les variables sont données dans le Tableau 3.9.

Variabes	α	β	γ	$\gamma - \alpha$	$\beta - \alpha$	$\beta - \gamma$
Corrélation avec q	-0,15	-0,33	0,20	0,25	-0,28	-0,38

TABLEAU 3.9 – Tableau de corrélation des angles et « angles relatifs » de la BRDF avec le coefficient de luminance q .

On peut voir que les valeurs de corrélation entre le coefficient de luminance q et les nouvelles variables $\gamma - \alpha$, $\beta - \alpha$ et $\beta - \gamma$ sont relativement meilleures que celles obtenues avec les variables originales, c'est pourquoi nous les gardons pour le développement de la méthode.

Afin de vérifier que ce choix n'est pas une mauvaise idée, nous avons essayé de prédire la valeur de q dans un modèle d'arbre de décision du type *random forest* en utilisant toutes les variables explicatives. Un arbre de décision est un modèle d'apprentissage automatique qui fixe des seuils servant de critère pour diviser un ensemble de données en sous-ensembles similaires ou en sous-ensembles avec moins d'impuretés. Un des attributs de ce modèle s'appelle l'importance des variables. Elle mesure en moyenne le rôle joué par chaque variable dans la séparation de l'arbre de décision et la prédiction de la valeur de q . Il y a autant d'importance qu'il y a de variable (donc 6 dans notre cas) et leur somme vaut 1.

On a donc évalué l'importance des variables α , β , γ , $\gamma - \alpha$, $\beta - \alpha$ et $\beta - \gamma$ dans les variations de q . Cette méthode nous a permis de constater que les « angles relatifs » figurent parmi les variables les plus importantes (cf. Figure 3.14). Ces importances nous confortent dans notre choix de garder ces « angles relatifs » pour développer notre méthode.

La méthode développée consiste à chercher les 5 voisins les plus proches en utilisant une distance euclidienne qui dépend de ces 6 variables α , β , γ , $\gamma - \alpha$, $\beta - \alpha$ et $\beta - \gamma$ (méthode kNN). Chaque voisin contribue ensuite à l'estimation du coefficient de luminance recherché

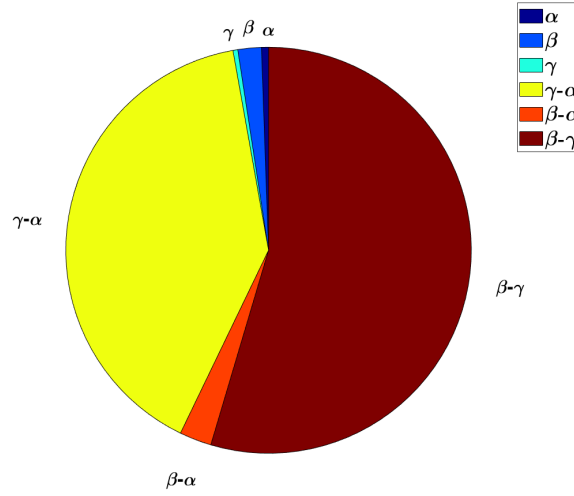


FIGURE 3.14 – Diagramme représentant l'importance de chaque variable dans la valeur du coefficient de luminance q .

q^* avec un poids inversement proportionnel à la distance euclidienne d qui le sépare de q^* (cf. Équations 3.38 et 3.39).

$$q^* = \sum_{k=1}^5 q_k \times w_k \quad (3.38)$$

$$w_k = \frac{1}{\sum_{i=1}^5 \frac{1}{d_i}} \quad (3.39)$$

Choix de la méthode utilisée

Nous avons ensuite comparé les performances des deux méthodes grâce à une BRDF dont nous disposons. Pour cela, nous avons reconstruit des tables- r avec les deux méthodes et avons évalué leur *Normalized Root Mean Square Deviation* (*NRMSD*, défini par Greffier et al. (2021)) avec la table- r de référence correspondante (cf. Figure 3.15). Pour des angles d'observation α compris entre 1° et 45° , soit dans le domaine d'interpolation, les deux méthodes amènent à des résultats comparables. Cependant, lorsque α devient supérieur à 50° , l'extrapolation amène à des déviations non négligeables lorsque la méthode par ajustement logarithmique du Q_0 est utilisée ($NRMSD = 0,7$ pour $\alpha = 90^\circ$ avec la méthode par ajustement logarithmique du Q_0 et $NRMSD = 0,39$ pour $\alpha = 90^\circ$ pour l'autre méthode).

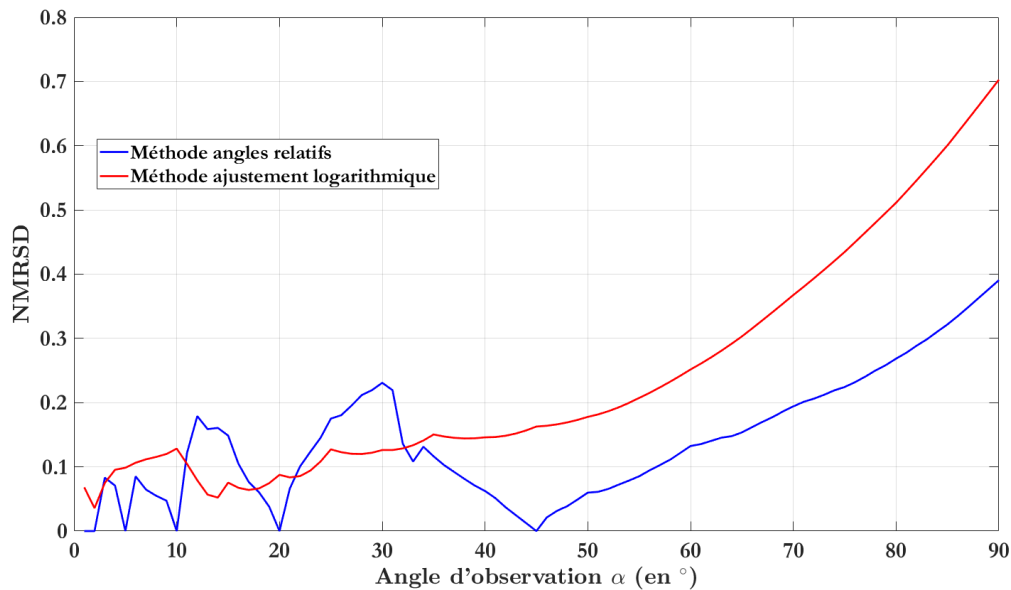


FIGURE 3.15 – Valeurs de $NMRSD$ en fonction de l'angle d'observation α pour les deux méthodes de reconstruction de tables- r .

Dans notre cas de l'estimation de l'éclairement réfléchi arrivant sur la cible dans le calcul du VL, nous avons décidé de considérer les réflexions de la lumière se faisant sur une surface de route de $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ au pied de la cible. Cette surface est découpée en 20×20 surfaces élémentaires. Si on regarde les angles α que font chacun des centres de ces surfaces avec le centre de la cible, seulement 6 angles sur les 400 sont supérieurs à 50° , ce qui représente 1,5%. On peut donc supposer que l'utilisation de la méthode par ajustement logarithmique du Q_0 n'apporte pas de pénalité significative par rapport à la seconde méthode quant à l'éclairement réfléchi arrivant sur la cible.

Afin de vérifier cette hypothèse, le logiciel ESPRIE est complété avec les deux méthodes pour tenir compte des réflexions de la lumière sur la surface de la route. On évalue ensuite l'éclairement réfléchi avec chacune de ces méthodes pour quatre situations en reprenant les données du site Lumiroute® :

1. Installation d'éclairage de la section 1 et revêtement de cette même section
2. Installation d'éclairage de la section 1 et revêtement de la section 4
3. Installation d'éclairage de la section 4 et revêtement de cette même section
4. Installation d'éclairage de la section 4 et revêtement de la section 1

On choisit de prendre les revêtements des sections 1 et 4 car ce sont ceux qui présentent les propriétés de réflexion les plus différentes. Aussi, la simulation des installations d'éclairage de ces deux sections permet d'avoir des résultats pour différents types de lampe. L'éclairage réfléchi est évalué pour 60 positions de cible correspondants aux 60 points du maillage normalisé (cf. Figure 2.14).

L'écart relatif entre les deux méthodes est calculé pour chaque situation (cf. Équation 3.40) et on donne un aperçu des résultats dans le tableau 3.10. On observe que les écarts relatifs sont inférieurs à 3 % en moyenne et qu'ils ne dépassent jamais 5 % (en valeur absolue). Les écarts relatifs entre les deux méthodes sont ainsi considérés comme négligeables et on en conclue que l'utilisation d'une méthode plutôt que l'autre n'influe que très peu sur l'éclairage réfléchi arrivant sur la cible. Par ailleurs, les temps de calcul pour chaque méthode ont été relevés et moyennés pour les 4 situations. Le calcul est réalisé avec Matlab R2018a et un processeur Intel® Core™ i7 4.20 Ghz. La méthode par Q_0 prend en moyenne environ 2 secondes pour estimer les coefficients r utiles quand la méthode des plus proches voisins met plus de 2 minutes à faire la même estimation. C'est donc cette importante différence de temps de calcul qui a fait basculer notre choix vers la première méthode. Pour la suite de ce manuscrit, la méthode par ajustement logarithmique du Q_0 est donc utilisée pour estimer les coefficients réduits de luminance utiles au calcul de l'éclairage réfléchi arrivant sur la cible dans l'évaluation du VL .

$$\Delta E_{CR} = 100 \times \frac{E_{CR_{\text{méthode } Q_0}} - E_{CR_{\text{méthode kNN}}}}{E_{CR_{\text{méthode kNN}}}} \quad (3.40)$$

Situation	1	2	3	4
Écart relatif moyen (en %)	-1,07	-2,15	-2,07	-1,14
Écart-type des écarts (en %)	0,82	1,22	1,14	0,69
Écart relatif minimal (en %)	-2,98	-4,82	-4,55	-2,83
Écart relatif maximal (en %)	2,15	-0,36	-0,47	-0,15

TABLEAU 3.10 – Écarts relatifs entre les éclairages réfléchis obtenus via les deux méthodes de détermination des coefficients réduits de luminance.

3.3.3.4 Simulation du VL complet sur le site Lumiroute®

Le modèle de niveau de visibilité d'Adrian est complété dans le logiciel ESPRIE avec la méthodologie que nous venons de décrire pour tenir compte des réflexions de la lumière

sur la surface de la route. Il est de nouveau mis en œuvre pour les quatre sections du site Lumiroute® et on résume les résultats obtenus dans le Tableau 3.11. Pour chaque tronçon routier, les variations du pourcentage de cibles visibles ainsi que les écarts relatifs entre les luminances de cibles dus à l'ajout des réflexions sont évalués.

Section	Observateur	$ VL_{complet} > 7$	Différence de visibilité avec la méthode incomplète
1	Voie 1	93,33 %	-3,33 %
	Voie 2	96,67 %	-3,33 %
2	Voie 1	98,33 %	-1,67 %
	Voie 2	100,00 %	0,00 %
3	Voie 1	85,00 %	-3,33 %
	Voie 2	93,33 %	0,00 %
4	Voie 1	80,00 %	-6,67 %
	Voie 2	91,67 %	-1,67 %

TABLEAU 3.11 – Calculs de visibilité tenant compte des réflexions de la lumière sur le revêtement pour chaque section du site expérimental Lumiroute® lorsque l'observateur se trouve sur la voie rapide (voie 1) ou sur la voie lente (voie 2).

Tout d'abord, on peut observer l'influence du revêtement sur la luminance de la cible sur la Figure 3.16. Les revêtements des sections 3 et 4 ne contribuent en moyenne que pour environ 8 % de la luminance totale de la cible alors que ceux des sections 1 et 2 apportent jusqu'à 15 % de luminance supplémentaire en moyenne. L'écart peut même aller jusqu'à 40 % pour les sections 1 et 2 lorsque la cible est placée tout à droite de la grille de mesure ce qui montre bien l'effet du revêtement sur la luminance de la cible et donc potentiellement sur sa visibilité (cf. Figure 3.16).

Par ailleurs, on voit dans le Tableau 3.11 qu'en moyenne le pourcentage de cibles visibles varie de -2,5 %. Il y a donc très peu de différence entre les résultats obtenus pour la visibilité de cible avec et sans prise en compte des réflexions lumineuses sur la chaussée quel que soit le tronçon. Cependant, cela suggère que des zones d'invisibilité sont apparues ponctuellement après l'ajout des réflexions lumineuses, ce qui peut potentiellement poser des problèmes de sécurité. C'est pourquoi nous trouvons important de considérer l'effet du revêtement.

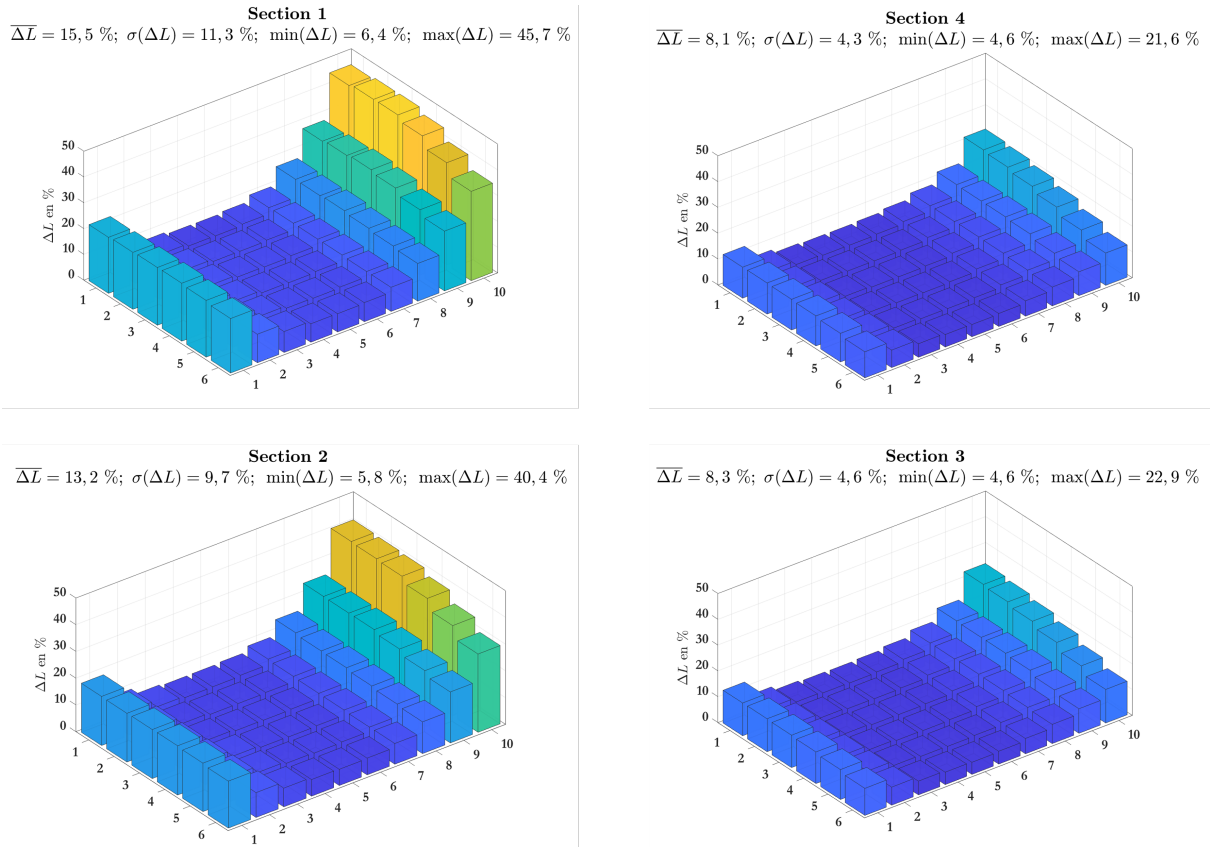


FIGURE 3.16 – Pour chaque section du site expérimental Lumiroute®, écarts relatifs entre les luminances de cibles dont le calcul prend en compte les réflexions de la lumière sur la surface de la route et celles où elles ne le sont pas.

Aussi, la combinaison de la photométrie de la route et de celle des luminaires a tout de même une certaine influence sur la visibilité. Lorsque les pourcentages de cibles visibles du Tableau 3.11 sont comparés entre les sections, on constate des différences : les sections 3 et 4 n’ont pas plus de 95 % de leurs cibles qui sont visibles quelle que soit la place de l’observateur contrairement aux sections 1 et 2 qui dépassent quasiment ce seuil pour toutes les positions de l’observateur.

3.4 Mesures sur le site expérimental Lumiroute®

Afin d’examiner localement la capacité du couple revêtement/éclairage à révéler la présence d’un obstacle sur la route en situation réelle, nous avons mené une campagne de mesures sur une partie du site expérimental Lumiroute®. Nous avons estimé les perfor-

mances des configurations évaluées en utilisant uniquement les critères classiques puis en évaluant le niveau de visibilité d'une cible standard placée en chaque point de la grille normalisée. L'effet du revêtement routier sur la visibilité a également été examiné en annihilant expérimentalement son influence sur la luminance de la cible à l'aide d'un drap noir. Enfin, sur l'une des configurations, nous avons étudié l'influence d'une réduction de puissance sur l'installation d'éclairage à nouveau par les critères classiques et par des mesures de visibilité.

La zone de mesure se compose des sections 2 et 4 du site expérimental Lumiroute®, décrite dans la section 3.2.2. Les mesures expérimentales ont été effectuées de nuit pour trois combinaisons de revêtement routier et d'éclairage différentes, résumées ci-dessous :

- La section 2a est constituée du revêtement routier Lumiroute® 2 combiné à un éclairage LED avec un flux lumineux de 4600 lumens.
- La section 2b est identique à la section 2a, mais le flux des luminaires LED est réduit d'environ 48 %, soit 2392 lumens.
- La section 4 est composée d'un revêtement routier traditionnel brut combiné à un éclairage composé de sources à décharge aux halogénures métalliques avec un flux de 7837,5 lumens.

3.4.1 Mesures expérimentales

3.4.1.1 Mesures traditionnelles

Pour chaque configuration, des mesures de luminance sont effectuées à l'aide d'un appareil de mesure de la luminance par imagerie (ILMD) placé à 60 m devant le maillage normalisé (cf. Figure 2.14) au milieu de la voie lente (Greffier, 2022). On évalue également les éclairagements horizontaux et verticaux à 12,5 cm du sol pour chaque point du maillage. Les résultats de mesure sont donnés en Annexe A.1. La luminance moyenne ainsi que les uniformités générale et longitudinale sont ensuite calculées et reportées dans le tableau 3.12. Les résultats montrent que les critères de performance sont respectés pour chacune des configurations et que les installations d'éclairage sont donc conformes à la norme EN 13201 (CEN, 2015b) (classes M3 et M5 dans le Tableau 2.4).

On remarque également que les résultats obtenus ne correspondent pas tout à fait à ceux trouvés en simulation (cf. Tableau 3.7 et Annexe A.1). Plusieurs hypothèses expliquant ces

Section	Flux (en lumen)	L_{moy} (en $cd.m^{-2}$)	U_0	U_l
2a	4600	1,22	0,49	0,71
2b	2392	0,64	0,50	0,73
4	7837,5	0,64	0,52	0,76

TABLEAU 3.12 – Valeurs mesurées sur le site Lumiroute® pour les critères de qualité classiques.

différences sont faites. En comparant les mesures d'éclairages horizontaux aux valeurs obtenues par simulation, on trouve un écart moyen sur la totalité de la grille normalisée de 30 % pour la section 2 ce qui peut expliquer les écarts que nous retrouvons ensuite en luminance. Nos suppositions concernent la photométrie et les paramètres des luminaires des sections 1 et 2 car les plus gros écarts sont trouvés en voie rapide. D'autre part, pour la section 4, nous arrivons à faire correspondre les éclairages horizontaux simulés et mesurés. Mais, lorsque nous passons à la luminance au sol, un écart moyen de 33 % est rencontré : nous en déduisons que les propriétés photométriques du revêtement ont évolué entre l'année où elles ont été évaluées au gonioréfectomètre et notre expérimentation sur site⁶.

3.4.1.2 Mesures de visibilité

Pour compléter nos mesures et évaluer localement les capacités du couple revêtement/éclairage sur la visibilité de la cible, pour chaque configuration, des mesures de la luminance de la surface de la route et de la luminance de la cible ont été effectuées pour toutes les positions définies par le maillage précédemment cité. La cible utilisée pour les mesures du VL est un spectralon carré de 25 cm de côté avec une réflectance de 20 %. Pour chaque position, la cible a été placée verticalement, une image a été capturée, puis un tissu noir de 1 m x 1 m a été placé sur le sol au pied de la cible pour éliminer les réflexions lumineuses de la surface de la route et une deuxième image a été prise (cf. Figure 3.17). La cible est détournée à la main sur chaque image pour en déduire sa luminance (cf. Figure 3.18).

De nouveau, des écarts sont constatés entre mesure et simulation (cf. Annexe A.1). En plus des hypothèses déjà formulées, un supposition supplémentaire concerne la présence

6. Les carottes de revêtement mesurées au gonioréfectomètre avaient été prélevées après 3 ans de mise en service. Notre expérimentation a eu lieu 8 ans après la mise en service.

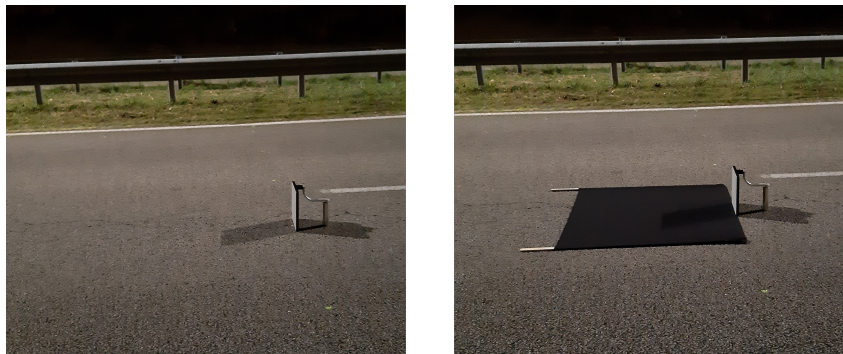


FIGURE 3.17 – Élimination des réflexions lumineuses sur la surface de la route en plaçant un tissu noir de 1 m^2 au pied de la cible.



FIGURE 3.18 – À gauche : Image capturée du point de vue de l'observateur en voie lente sur la section 2 avec la cible positionnée en un point de la grille de mesure. À droite : Nous délimitons la zone correspondant à la cible (en vert) et les zones utilisées pour la luminance de fond dans le calcul du VL (en rouge).

de sources parasites participant à l'éclairage vertical arrivant sur la cible. En effet, pour la section 4, bien que les éclairages horizontaux soient les mêmes en simulation et en mesure, ce n'est pas le cas des éclairages verticaux à $12,5 \text{ cm}$ (centre de la cible). Un écart moyen de 78% est trouvé. On peut voir la présence d'une source qui semble beaucoup éclairer sur l'image de gauche de la Figure 3.18, au fond à droite. Cette source pourrait grandement participer à l'éclairage vertical des cibles en section 4 puisque cette portion de route se trouve dans le sens opposé à la prise d'image de la Figure 3.18.

Malgré ces non-concordances entre simulation et mesure, l'évaluation du couple revêtement/éclairage sur la visibilité de la cible peut tout de même être réalisée. Nous étudions d'abord les mesures obtenues pour les sections 2b et 4 puisqu'elles obtiennent des valeurs similaires pour les performances traditionnellement évaluées. Nous comparerons ensuite

les résultats obtenus pour les sections 2a et 2b afin d'étudier l'influence d'une réduction de puissance.

Étude pour des sections ayant la même performance classique

Pour chaque section, nous calculons l'écart de luminance de la cible avec et sans réflexions lumineuses pour chaque position de la grille normalisée afin d'étudier l'influence du revêtement routier sur la luminance de cible (cf. Figure 3.19). On constate que les écarts sont presque toujours plus importants pour la section 2b que pour la section 4, ce qui rejoint les résultats des simulations faites dans la Section 3.3.3.4. Si l'on considère la moyenne de toutes les différences de luminance, on obtient une moyenne d'environ 10 % pour la configuration 2b et 5 % pour la configuration 4, soit deux fois moins. Ceci confirme ce que nous avons trouvé en simulation, c'est-à-dire que la nature du revêtement routier a un impact plus ou moins important sur la luminance de la cible.

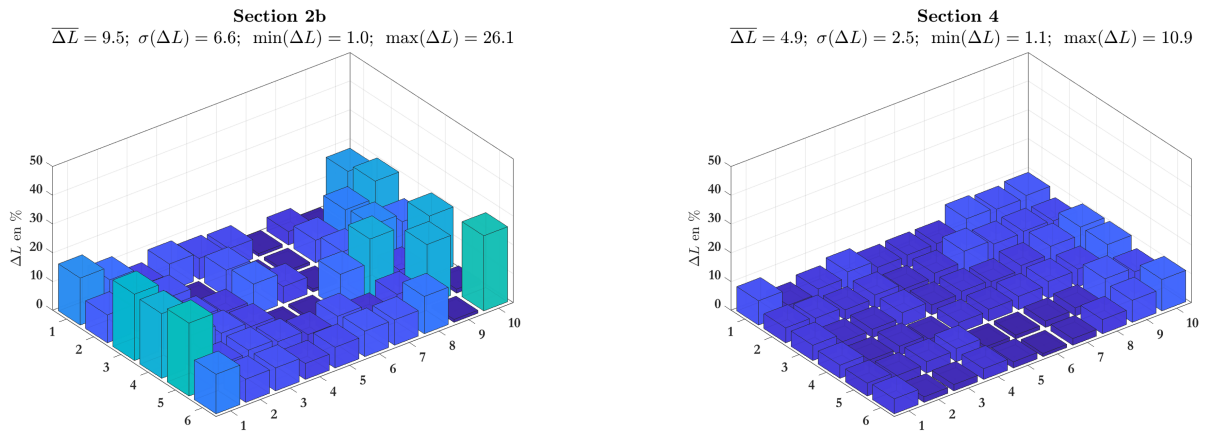


FIGURE 3.19 – Écarts relatifs entre les luminances de cible obtenues en posant le drap noir au sol et sans, pour les configurations 2b (à gauche) et 4 (à droite).

D'autre part, nous déduisons le VL de la cible pour chaque position de la grille normalisée pour les deux sections, avec et sans réflexions lumineuses. En considérant qu'une cible avec $|VL| \geq 7$ est visible et qu'une cible avec $|VL| < 7$ ne l'est pas, nous regardons si la visibilité de la cible change quelque part dans la grille après l'ajout de réflexions lumineuses (cf. Figure 3.20).

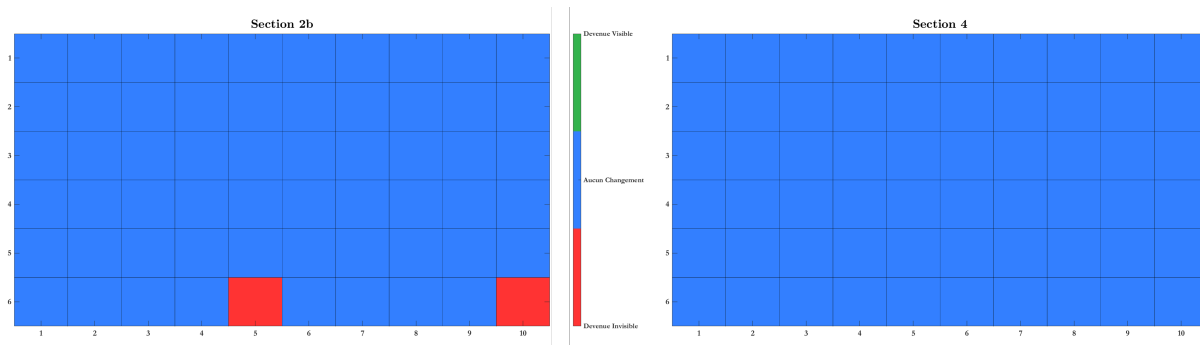


FIGURE 3.20 – Changement de visibilité de la cible pour chaque position après prise en compte des réflexions lumineuses sur la surface de la route pour la section 2b (à gauche) et la section 4 (à droite).

En faisant une analyse croisée des Figures 3.19 et 3.20, on constate que ce ne sont pas nécessairement les écarts de luminance de cible les plus importants qui entraînent un changement dans la visibilité de la cible. Par exemple, la cible placée sur la section 2b aux coordonnées (5, 6) reçoit 7,2 % de luminance en plus en raison des réflexions de la lumière sur la surface de la route et devient invisible (en rouge sur la Figure 3.20), alors que la cible placée en (1, 3) a une différence de luminance de plus de 20 % et sa visibilité ne change pas (en bleu sur la Figure 3.20). Cela s’explique facilement : lorsque le VL de la cible est proche du seuil de 7 avant prise en compte des réflexions lumineuses, une petite quantité de luminance supplémentaire peut ramener le VL en dessous de ce seuil. Au contraire, lorsque le VL est beaucoup plus élevé (ou beaucoup plus bas) que 7 (en valeurs absolues), même un ajout important de luminance n’entraîne pas de changement de visibilité dans la plupart des cas.

La Figure 3.20 montre également que lorsque changement de visibilité il y a, ce sont les cas où les cibles deviennent invisibles. Cela s’explique par le fait que la cible présente un contraste négatif avec la route, c’est-à-dire que sa luminance est inférieure à celle de la route. Ainsi, lorsque les réflexions de la lumière sur la route sont prises en compte, la luminance de la cible peut augmenter et se rapprocher de celle de l’arrière-plan, de sorte que le VL diminue et se rapproche du seuil critique. Si le VL en était déjà proche, il devient alors inférieur et la cible est considérée invisible.

Enfin, on constate la nécessité de réinvestir le modèle de visibilité d’Adrian comme critère de performance d’une installation d’éclairage. En effet, malgré les bons résultats

obtenus pour les critères classiques, notamment en terme d'uniformités de luminance (cf. Tableau 3.12), les performances locales ne sont pas du tout comparables. Lorsqu'on regarde la Figure 3.21 représentant la visibilité de la cible en chaque point de la grille normalisée, on constate que la cible n'est pas visible (en rouge) pour une partie des points quelle que soit la section considérée, ce qui peut poser des problèmes de sécurité localement. En outre, malgré leurs performances classiques similaires, les sections 2b et 4 n'offrent pas du tout la même répartition de visibilité de la cible. Pour la configuration 2b, la cible est visible pour 90,00 % (54/60) des positions de la grille alors que ce n'est le cas que pour 61,67 % (37/60) pour le couple revêtement/éclairage de la section 4.

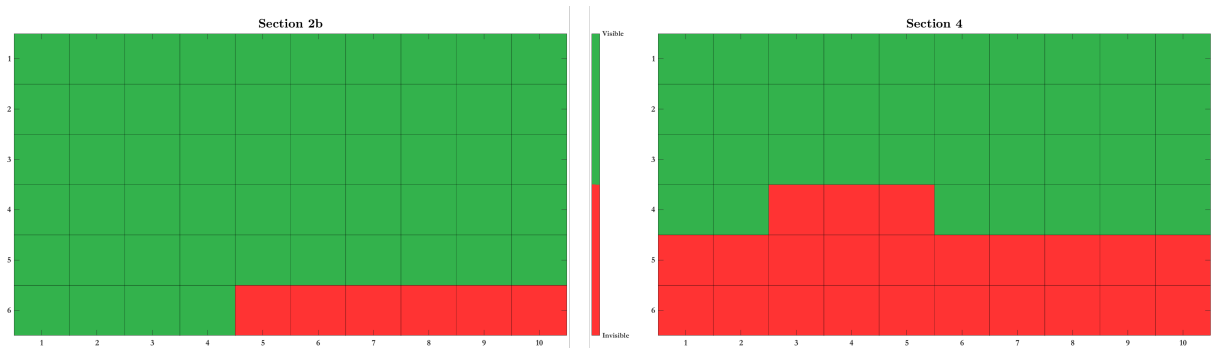


FIGURE 3.21 – Visibilité de la cible pour chaque position après prise en compte des réflexions lumineuses sur la surface de la route pour la section 2b (à gauche) et la section 4 (à droite).

Étude de l'influence d'une diminution du flux lumineux

Pour étudier l'influence d'une réduction de puissance, nous allons maintenant comparer les mesures des sections 2a et 2b. Tout d'abord, on constate dans le Tableau 3.12 que la réduction de 48 % du flux du luminaire entre les configurations 2a et 2b n'affecte que la luminance moyenne L_{moy} mesurée sur la grille normalisée. Les uniformités de luminance sont similaires, ce qui est un comportement typique pour une installation d'éclairage équipée de lampes LED.

De plus, nous considérons l'influence de la réduction de puissance sur le VL . La Figure 3.22 représente la visibilité de la cible sur la section 2 avec un flux lumineux de 4600 lumens (donc avant l'abaissement) en considérant un seuil de VL de 7. La cible est visible

pour 98,33 % (59/60) des positions de la grille CIE alors qu'elle l'est pour 90,00 % lorsque le flux est abaissé (Figure 3.21, à gauche).

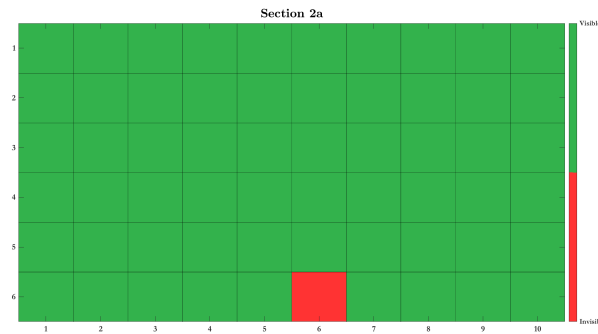


FIGURE 3.22 – Visibilité de la cible pour chaque position après prise en compte des réflexions lumineuses sur la surface de la route pour la section 2a.

Malgré des uniformités de luminance similaires, la distribution de la visibilité de la cible sur la grille n'est pas la même lorsque le flux du luminaire est modifié. Contrairement au raisonnement habituel, la réduction de puissance ne conduit pas seulement à une diminution de la luminance moyenne mais aussi à une modification locale de la visibilité. Ce résultat confirme la nécessité d'ajouter une mesure de visibilité aux critères de performance classiques afin de tenir compte localement des performances de la chaussée et de l'éclairage.

3.5 Estimation de la visibilité pour un second site expérimental

La confrontation entre les critères de qualité calculés à partir des mesures faites sur le site expérimental Lumiroute® et ceux obtenus via notre logiciel de simulation a montré des discordances. Nous avons supposé que ces différences étaient dues à l'utilisation, dans ESPRIE, de paramètres qui ne correspondaient pas avec la réalité pour les luminaires, notamment leur photométrie, et de tables- r incorrectes suite à une évolution des propriétés de réflexion de la chaussée.

Afin de vérifier que notre logiciel est correctement codé et que ces hypothèses pourraient donc expliquer les différences trouvées, nous avons examiné les performances d'une

installation d'éclairage d'un autre site expérimental par simulation et par mesure.

Le site expérimental est situé sur une route de zone industrielle (rue Pierre Michaux) à Limoges, en France. Il s'agit d'une chaussée à deux voies de 7 m de large équipée d'un système d'éclairage LED unilatéral avec des luminaires de 8 m de haut et espacés de 28,5 m. Le revêtement routier est un enrobé bitumineux avec une fraction granulaire composée de 30 % de porcelaine broyée (cf. Figure 3.23, à gauche), ce qui, outre les enjeux de recyclage industriel, permet de rendre la chaussée plus claire et donc de limiter la puissance lumineuse utilisée (Carnis, 2017). La photométrie de la surface de la route a été caractérisée par les tables- r mesurées avec le gonioréfectomètre de laboratoire du Cerema pour différents angles d'observation (1° , 3° , 5° , 10° , 20° , 45° et 80°). On trace le solide photométrique mesuré pour $\alpha = 1^\circ$ sur la Figure 3.23, à droite. Cette route est principalement destinée aux véhicules motorisés et la vitesse maximale autorisée est de 50 km/h. Ces caractéristiques correspondent à une classe d'éclairage M3 (CEN, 2015b; CIE, 2010a). Le flux des luminaires est de 4766 lumens et le facteur de maintenance équivaut à 0,9.

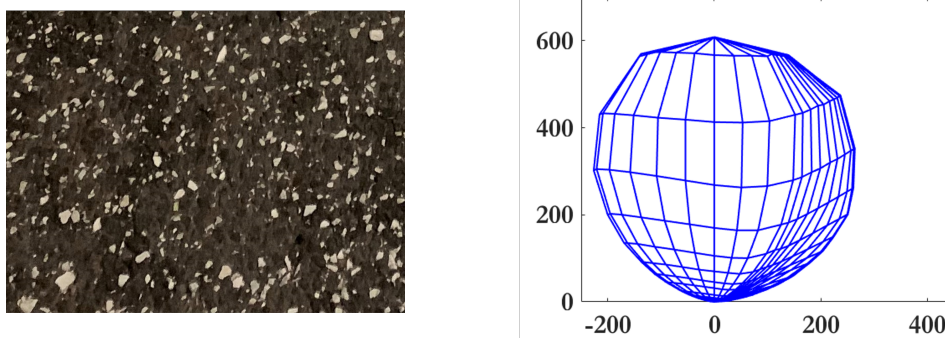


FIGURE 3.23 – À gauche : Image de la surface du revêtement composé avec de la porcelaine broyée. À droite : Solide photométrique de ce même revêtement pour $\alpha = 1^\circ$ ($Q_0 = 0,110$ et $S_1 = 0,32$).

L'éclairement horizontal, l'éclairement vertical à 12,5 cm du sol, la luminance moyenne, les uniformités générale et longitudinale, et le niveau de visibilité avec et sans réflexions lumineuses sont mesurés et calculés pour un observateur en milieu de voie lente. Les tableaux détaillés des résultats sont données en Annexe A.2. On résume dans le Tableau 3.13 les valeurs des critères de qualité obtenus par simulation et par la mesure sur le site expérimental.

	L_{moy} (en $cd.m^{-2}$)	U_0	U_l	$ VL > 7$
Simulation	0,95	0,44	0,72	86,67 %
Mesure	0,90	0,44	0,76	85,00 %

TABLEAU 3.13 – Critères de qualité obtenus en simulation et par la mesure sur site.

On observe que les valeurs obtenues par simulation sont proches de celles calculées à partir des mesures effectuées sur le site expérimental. Aussi, le pourcentage de cibles visibles après prise en compte des réflexions lumineuses est similaire ainsi que sa distribution sur la chaussée. En effet, si on regarde la Figure 3.24, on voit que la répartition de la visibilité sur la chaussée est la même, à l’exception de la cible en (2, 1) qui n’est pas visible en mesure alors qu’elle l’est en simulation. Ces résultats nous confortent dans les choix que nous avons fait pour le développement de notre logiciel de calcul d’éclairage. De plus, cette concordance renforce nos hypothèses d’explication d’erreurs pour les simulations concernant le site Lumiroute®. Enfin, on voit de nouveau la nécessité de réintégrer le critère de visibilité dans le dimensionnement d’éclairage en simulation car, si les résultats ne sont pas bon en simulation, ils peuvent être encore pire dans la réalité.

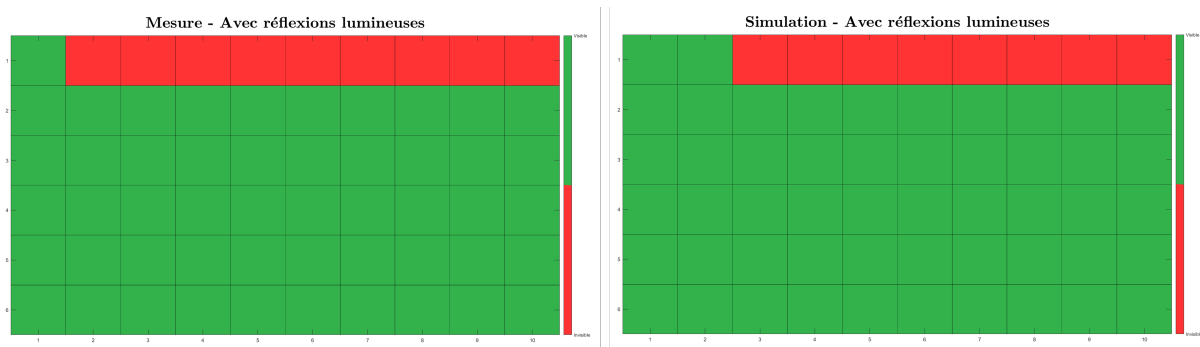


FIGURE 3.24 – Visibilité de la cible pour chaque position avant et après prise en compte des réflexions lumineuses sur la surface de la route par la mesure (à gauche) et par la simulation (à droite).

Ce chapitre s’est particulièrement focalisé sur le développement d’un logiciel de calcul d’éclairage permettant l’estimation des performances d’une installation selon les recommandations actuelles. Des modifications y ont été apportées afin de mieux considérer les propriétés de réflexion des revêtements. Cela nous a permis de montrer la nécessité de les prendre en compte pour éviter d’éventuelles erreurs pouvant amener soit à un sous-éclairage soit à la possibilité de faire des économies d’énergie. Par ailleurs, l’ajout à notre

logiciel du niveau de visibilité d'une cible en suivant le modèle d'Adrian nous a permis de voir que les critères de performance actuels ne suffisent pas à assurer la sécurité des usagers sur l'ensemble de la chaussée. Des zones d'invisibilité peuvent être trouvées localement sans pour autant que les critères de performance ne soient en-deçà des valeurs recommandées. La question qui se pose maintenant est de savoir évaluer si une installation d'éclairage convient à tous les usagers de l'espace public, quel que soit leur mode de locomotion. Le prochain chapitre va donc s'intéresser à l'influence d'un changement de géométrie d'observation.

ÉVOLUTION DE LA GÉOMÉTRIE D'OBSERVATION EN ÉCLAIRAGE URBAIN

Comme nous l'avons déjà évoqué, la géométrie actuelle d'évaluation des performances d'une installation d'éclairage est dédiée à un automobiliste se déplaçant sur une route interurbaine à une vitesse comprise entre 70 et 90 km/h (Muzet et al., 2020). Cela correspond à une distance de 86 m devant le conducteur, soit une distance de l'ordre de la distance d'arrêt sur route sèche (Muzet et al., 2020). Cependant, la plupart de l'éclairage public se trouve aujourd'hui en ville, là où la vitesse est généralement entre 30 et 50 km/h. De plus, l'éclairage urbain doit répondre aux besoins visuels de tous les usagers de l'espace public afin de leur assurer « une sécurité et un confort aussi élevés que possible » (CIE, 1965b). Cela ne concerne donc pas seulement les automobilistes mais aussi les cyclistes et les piétons. Dès lors, pour identifier les besoins de lumière sur les surfaces routières, il est essentiel de savoir où les usagers regardent afin de leur offrir, au bon endroit, la quantité de lumière nécessaire pour assurer leur sécurité.

Ce chapitre est consacré à la prise en compte de tous les usagers et aux évolutions des pratiques que cela implique dans le dimensionnement d'installations d'éclairage. Nous présentons une expérimentation avec sujets qui a été menée dans le but d'étudier l'influence de la modalité de déplacement sur la géométrie d'observation de la route. Ensuite, les résultats obtenus sont intégrés dans le logiciel de simulation pour évaluer l'impact du changement de la géométrie d'observation sur les critères de qualité d'une installation d'éclairage et sur le critère de visibilité. Des mesures photométriques sur site expérimental ont également été réalisées et une comparaison entre simulation et mesure est présentée. Les conclusions de ce chapitre nous amèneront à proposer des adaptations des recommandations actuelles.

4.1 Où regardent les usagers lors de leurs déplacements nocturnes ?

Pour savoir comment éclairer, il faut déjà savoir où on regarde. Une des techniques possibles pour avoir accès à cette information est de faire appel à la réalité virtuelle (RV). En effet, les outils et techniques de RV permettent d’immerger un humain dans un environnement numérique 3D avec lequel il peut interagir en temps réel de manière pseudo-naturelle. Grâce à la puissance des ordinateurs et en particulier des cartes graphiques de dernière génération, la RV peut être utilisée pour simuler des environnements urbains très réalistes intégrant des effets visuels avancés (simulation d’éclairage, réflexion de matériau, conditions atmosphériques, etc.).

Dans le travail présenté dans cette section, nous utilisons des techniques de RV couplées à de l’oculométrie pour étudier l’influence de la modalité de déplacement (piéton, cycliste, automobiliste) sur l’angle d’observation en milieu urbain nocturne. L’utilisateur se déplace dans un environnement virtuel (EV) en différents lieux (rue *vs* trottoir) et à différentes vitesses représentatives de la modalité de déplacement que l’on veut étudier. Le choix de conduire cette expérimentation en RV a principalement été guidé par la volonté de s’affranchir des difficultés logistiques et méthodologiques de l’oculométrie lorsqu’il est utilisé en environnement naturel (Aletta et al., 2018) ainsi que pour s’assurer que chaque sujet soit dans les mêmes conditions expérimentales.

4.1.1 Première étude en environnement virtuel

Une première étude a été réalisée. Pour cela, nous avons choisi de simuler, avec Unity 3D, un quartier de centre-ville de nuit dans lequel peuvent se déplacer automobilistes, cyclistes et piétons dans un espace partagé (cf. Figure 4.1 à gauche). Afin de s’assurer que tous les participants prennent le même chemin dans la ville, nous avons décidé d’éteindre les luminaires des rues à ne pas emprunter. Ainsi, la consigne donnée aux sujets était de suivre la route éclairée et de rester concentrer sur leur trajet comme en situation réelle.

Huit personnes ont participé à cette expérience. Elle a consisté à suivre la route éclairée avec différents moyens de locomotion : en voiture, en vélo et à pied. Chaque participant a utilisé tous les modes de locomotion à tour de rôle pour se déplacer dans la ville, de façon aléatoire. Pour chaque modalité, le sujet a été mis en situation :

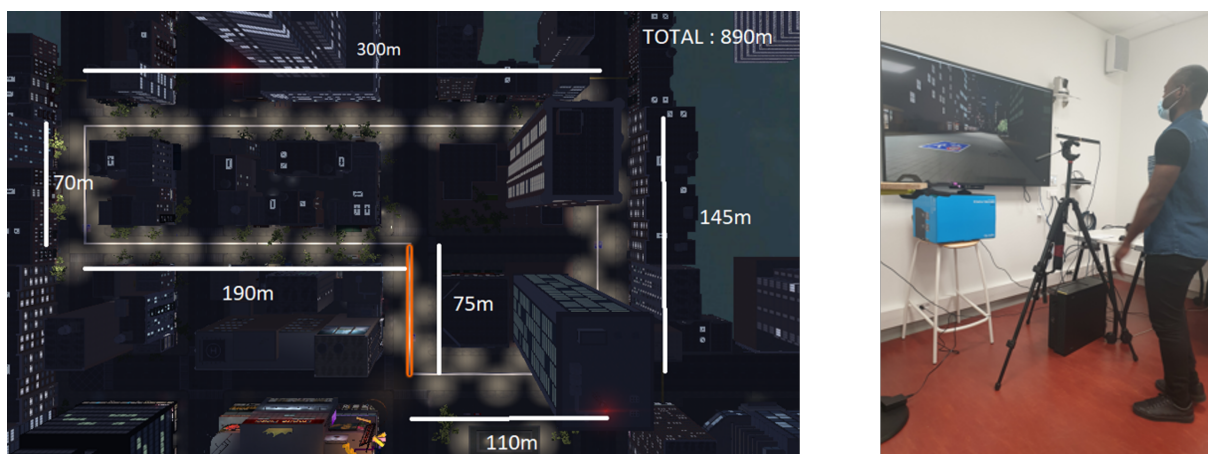


FIGURE 4.1 – A gauche : quartier de ville simulé sous Unity 3D pour l'étude préliminaire (vue du dessus). À droite : Configuration de la première expérimentation avec sujets.

- en tant que piéton, pour avancer, il fallait marcher sur place ;
- dans le rôle d'un cycliste, le participant était installé sur un vélo d'appartement et devait pédaler ;
- enfin, l'automobiliste était équipé d'un volant et d'un pédalier.

Pour chacune de ces trois conditions, la vitesse n'était pas constante mais limitée à une valeur maximale. Le participant était maître de sa vitesse jusqu'à une certaine limite (20 km/h en voiture, 10 km/h en vélo et 5 km/h à pied).

Les participants étaient installés devant un écran sur lequel s'affichait la scène simulée (cf. Figure 4.1 à droite). Un oculomètre (Tobii® Pro Fusion) était également placé devant le participant. Selon le fabricant, il offre une incertitude sur l'angle du regard de 0.3° . L'oculomètre a été relié à la simulation avant de faire l'expérimentation afin de savoir directement où se porte le regard de l'utilisateur dans l'EV et ainsi faciliter les traitements post-expérience. Les données recueillies à l'aide de l'oculomètre ont été traitées pour chaque participant afin de ne garder que les regards sur le sol puis elles ont été regroupées. On en a alors déduit l'angle d'observation moyen et l'écart-type pour chaque type de locomotion. Les résultats obtenus sont donnés dans le Tableau 4.1. De plus, on a effectué des tests de type ANOVA pour voir s'il existe un effet de la condition sur l'angle d'observation ainsi qu'entre condition mais aucune significativité ne s'est révélée ($F > 0,05$ toujours).

	Voiture	Vélo	Piéton
Angle moyen	5,4°	5,9°	6,7°
Écart-type	3,9°	3,7°	5,1°

TABLEAU 4.1 – Angles moyens et écart-types obtenus pour chaque condition de l'expérimentation préliminaire.

On a également calculé l'angle d'observation moyen de chaque sujet et son écart-type pour chaque type de locomotion. On voit sur la Figure 4.2 que, pour chaque type de locomotion, les intervalles de confiance à 95 %, obtenus à partir de l'équation 4.1, ne se chevauchent pas entre les participants ce qui indique une différence statistiquement significative entre les participants. On ne peut donc pas déduire un angle d'observation moyen par type de locomotion à partir des angles obtenus pour chaque participant. De plus, lorsqu'on regarde les variations d'angle entre chaque locomotion pour un même participant, les différences ne sont pas toujours visibles, il y a parfois des intervalles qui se superposent. Par exemple, on peut voir sur la Figure 4.2 que les intervalles obtenus pour les modalités voiture et vélo pour le participant n°3 se chevauchent.

$$IC(95 \%) = m \pm 1,96 \times \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (4.1)$$

où m est l'angle d'observation moyen, σ l'écart-type de la distribution des angles et N le nombre d'angles constituant la distribution.

Les angles d'observation sont généralement définis pour des lignes droites, la stratégie d'observation n'étant pas la même en virage. Or, on peut voir sur la Figure 4.1 à gauche que la ville simulée est constituée de plusieurs virages à angle droit. On a donc décidé de refaire l'analyse statistique mais en ne prenant que les données obtenues sur la ligne droite de 300 m. Les mêmes conclusions sont déduites du Tableau 4.2 et de la Figure 4.3 : on ne peut pas juger de la significativité de l'influence du mode de déplacement sur l'angle d'observation moyen.

	Voiture	Vélo	Piéton
Angle moyen	6,8°	5,3°	5,8°
Écart-type	5,2°	4,0°	4,8°

TABLEAU 4.2 – Angles moyens et écart-types obtenus pour chaque condition de l'expérimentation préliminaire sur la ligne droite de 300 m.

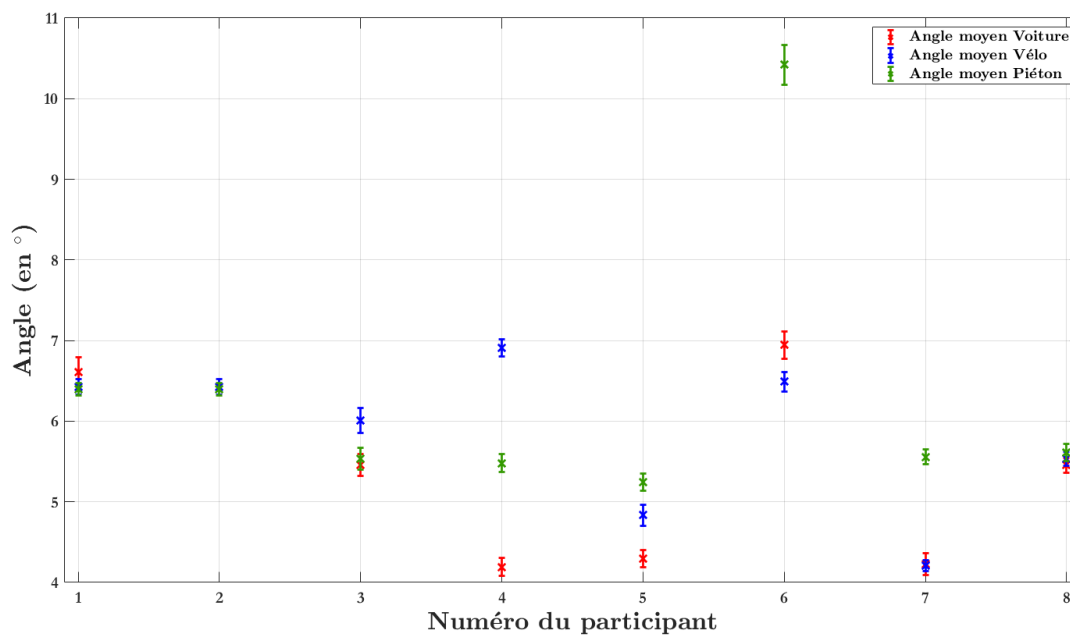


FIGURE 4.2 – Angles moyens et intervalles de confiance à 95 % obtenus par chaque participant dans chacune des conditions de l’expérimentation préliminaire.

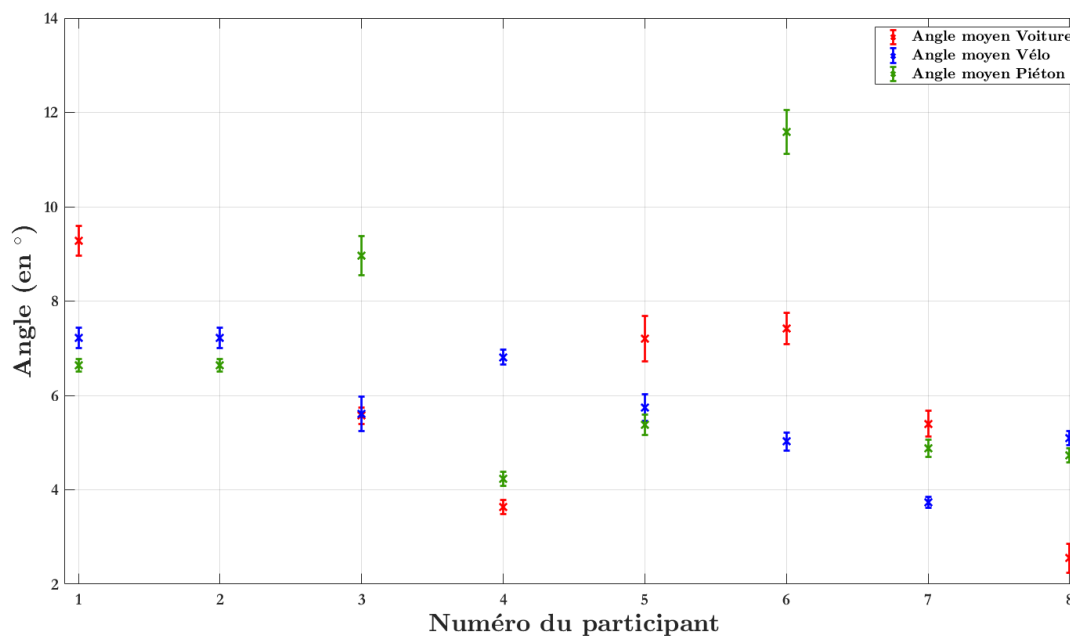


FIGURE 4.3 – Angles moyens et intervalles de confiance à 95 % obtenus par chaque participant dans chacune des conditions de l’expérimentation préliminaire en ne prenant en compte que les données recueillies le long de la ligne droite de 300 m.

Nous avons donc décidé de mener une seconde expérimentation en changeant certains paramètres. Tout d’abord, il est envisagé d’utiliser un casque de RV qui intègre un oculomètre pour une meilleure immersion. De plus, on a remarqué une certaine lassitude chez les participants lors de leurs déplacements. Il est donc nécessaire de mettre en place une double tâche. On a décidé de faire apparaître une cible sur la route à un moment donné et de demander au participant d’appuyer sur un bouton pour signaler l’obstacle. Ainsi, on demande plus d’attention au participant sans lui expliquer l’objectif de l’expérimentation. Par ailleurs, il nous a semblé intéressant d’ajouter une rocade autour de la ville afin de comparer les résultats obtenus avec l’angle de 1° recommandé sur route interurbaine. Enfin, il est envisagé d’avoir un trajet préprogrammé avec des portions de routes plus longues et une vitesse fixée pour chaque mode de locomotion. Il n’y aura plus de mise en situation non plus¹. Ainsi, le seul facteur changeant entre chaque condition sera la vitesse. L’objectif donné pour l’expérimentation est d’avoir une trentaine de participants minimum pour pouvoir appliquer des traitements statistiques sur les données.

4.1.2 Seconde expérimentation

Pour éviter d’éventuels problèmes dus à une mauvaise perception des échelles, nous avons choisi d’effectuer notre expérimentation en utilisant une approche immersive. Nous avons opté pour l’utilisation d’un casque de RV plutôt qu’un écran d’affichage afin d’assurer une meilleure immersion et pour ne pas avoir de difficultés de synchronisation entre le simulateur et l’oculomètre. Enfin, on a préféré utiliser une manette de jeu plutôt que de mettre le participant en situation afin d’être sûr qu’il ne fasse pas appel à des connaissances cognitives liées à la conduite, notamment lors des déplacements piéton et cycliste (Rasmussen, 1983).

4.1.2.1 Méthodologie

Participants

Quarante-cinq personnes ont participé à l’expérience (38 hommes et 7 femmes, âgés de 15 à 61 ans ; 22 % dans le groupe d’âge 15-29 ans, 53 % dans le groupe d’âge 30-49 ans et 25 % dans le groupe d’âge 50 ans et plus). Tous les participants ont déclaré avoir une

1. Ni émulation de marche, ni vélo d’appartement, ni volant et pédalier.

bonne vision et une bonne audition. Au total, 24 % des participants portaient des lunettes ou des lentilles de contact.

Les données de 8 participants ont été exclues de l'analyse parce qu'ils n'ont pas terminé l'expérience en raison d'un mal du simulateur.

Équipement

Le casque de réalité virtuelle utilisé est un VIVE Pro Eye fabriqué par HTC. Il est équipé d'un double écran OLED avec une résolution combinée de 2880 x 1600 pixels offrant un champ de vision de 110°, et d'un capteur SteamVR™ Tracking 2.0. Il dispose également d'écouteurs. La fréquence d'affichage est d'environ 90 fps. Le suivi oculaire est optimisé par Tobii® et offre une incertitude sur la position du regard comprise entre 0.5° et 1.1° selon le fabricant. Le casque de réalité virtuelle était connecté à un ordinateur sur lequel nous pouvions voir ce que le participant regardait en temps réel et suivre son chemin dans le monde virtuel (cf. Figure 4.4). Une manette de jeu connectée à l'ordinateur permettait au participant de naviguer dans la ville virtuelle.



FIGURE 4.4 – Configuration de la seconde expérimentation avec sujets.

Environnement virtuel

L'environnement virtuel a été conçu avec Unity 3D LTS Release 2019.4.24f1. La scène simulée se déroule de nuit et représente une ville constituée de plusieurs rues avec une

route interurbaine autour d'elle (cf. Figure 4.5). La route interurbaine est composée de quatre lignes droites d'environ 1800 m chacune et de quatre virages. Seuls des piétons étaient présents dans la ville, il n'y avait pas d'autre circulation ambiante pour assurer une scène de conduite répétable pour tous les sujets. La caméra virtuelle filmant l'image diffusée dans le casque a été placée à 1,5 m au-dessus du sol dans l'environnement virtuel pour correspondre aux normes d'éclairage routier (CEN, 2015c).

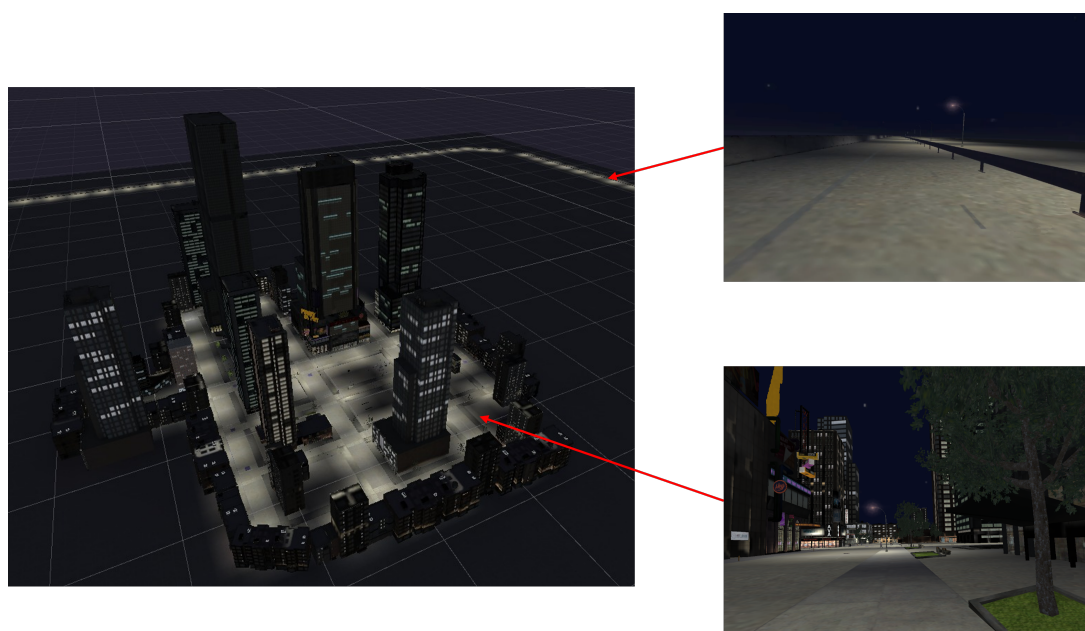


FIGURE 4.5 – À gauche, vue de haut sous Unity 3D de l'environnement virtuel (ville et portion de rocade en fond). À droite, exemples de visuel d'une rue de la ville en bas et d'une portion de rocade en haut.

Procédure

Les participants ont été invités à suivre des instructions audiodirectionnelles et à se concentrer sur leur trajet, c'est-à-dire la route ou le trottoir, de la même manière qu'en situation réelle². Ils devaient également signaler, avec un bouton sur la manette de jeu, la présence d'un obstacle représenté par une demi-sphère rouge (cf Figure 4.6), dès qu'ils la voyaient, pour assurer la double tâche simultanée. Ces apparitions ont été programmées pour se produire à des intervalles aléatoires entre 20 et 40 s à une distance de la caméra dans le monde virtuel entre 25 et 60 m. Le stimulus apparaissait au niveau du sol, dans

2. Les consignes qui ont été énoncées aux sujets sont données en Annexe A.3

la direction du regard du participant. Pour chaque apparition, l'obstacle restait visible pendant 5 s puis disparaissait s'il n'était pas détecté par le sujet. Le temps de réponse du participant a été enregistré.



FIGURE 4.6 – Image de la demi-sphère rouge qui apparaît aléatoirement pour assurer une double tâche simultanée.

Une procédure d'étalonnage en cinq points est effectuée pour chaque participant au début de l'expérience afin d'assurer un suivi fiable de la position du regard. Le système de suivi oculaire a fourni des données nous permettant de trouver la position de l'intersection du regard avec le monde virtuel. Pour se familiariser avec la simulation et l'équipement, tous les participants ont suivi un tutoriel avant de commencer l'expérience. Après cela, chaque participant a effectué un trajet pour chacune des quatre modalités de déplacement (piéton, cycliste, automobiliste urbain et automobiliste interurbain) dans un ordre aléatoire. Chaque passage a duré 300 s et le participant avait le choix de faire une pause entre chaque passage. Pour chaque modalité de déplacement, les participants faisaient tous le même trajet. Mais un trajet différent était associé à chaque mode de déplacement pour que la connaissance du trajet n'influence pas sur les résultats d'un autre mode. Les vitesses de déplacement dans chaque modalité étaient les suivantes :

- piéton : 6 km/h ;
- vélo : 12 km/h ;
- voiture en ville : 25 km/h ;
- voiture sur route interurbaine : 75 km/h.

À la fin de chaque expérimentation, pour chaque participant, le fichier résultant contenait les informations suivantes :

- l’horodatage,
- la modalité de déplacement du participant (piéton, cycliste, automobiliste en ville ou en interurbain),
- le temps de réaction pour détecter les demi-sphères rouges,
- les coordonnées $x_{\text{caméra}}$, $y_{\text{caméra}}$, $z_{\text{caméra}}$ du participant dans le monde virtuel,
- les coordonnées x_{impact} , y_{impact} , z_{impact} de l’intersection du regard avec l’objet dans le monde virtuel,
- le nom de l’objet examiné (route, immeuble, mobilier urbain, etc).

Ces informations ont été enregistrées pendant l’expérimentation à une fréquence de 20 Hz (soit toutes les 0,05 s).

4.1.2.2 Résultats

Traitement des données

Pour chaque participant, nous avons récupéré les données enregistrées (au total 24000 données oculométriques par personne) et les avons séparées en fonction de la modalité de déplacement (6000 par modalité et par personne). Les temps de réaction des participants ont été observés pour savoir s’ils respectaient la consigne donnée (se concentrer sur le trajet et détecter la cible rouge) et aucun d’eux n’a été exclu. Cependant, il a été décidé de ne pas intégrer dans les traitements les 100 premières observations de chaque individu pour chaque mode de déplacement (soit les cinq premières secondes pour chaque trajet) car c’est le temps moyen qu’ont mis les participants avant de commencer à se déplacer au début de chaque passage.

Ensuite, le sol étant l’élément du champ visuel le plus important pour le déplacement des usagers (CEN, 2015c; Fotios, Uttley, Cheal, & Hara, 2015), les données oculométriques sont filtrées afin de ne garder que celles qui correspondent à un regard porté sur celui-ci (la route ou le trottoir). Pour chaque mode de déplacement, les observations de tous les participants validant cette condition sont alors fusionnées. Le nombre de données oculométriques retenues pour chaque modalité de déplacement est proche d’une modalité à l’autre (cf. Tableau 4.3). On en déduit alors les angles d’observation α à partir de la

Formule 4.2. Unity 3D utilise un système de coordonnées main gauche de telle sorte que les coordonnées x et z définissent le plan du sol et y est orienté vers le haut.

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\sqrt{(x_{\text{impact}} - x_{\text{caméra}})^2 + (z_{\text{impact}} - z_{\text{caméra}})^2}}{\sqrt{(x_{\text{impact}} - x_{\text{caméra}})^2 + (y_{\text{impact}} - y_{\text{caméra}})^2 + (z_{\text{impact}} - z_{\text{caméra}})^2}} \right) \quad (4.2)$$

Mode de déplacement	Piéton	Cycliste	Automobiliste en ville	Automobiliste en interurbain
Nombre de données correspondant à un regard sur le sol	160 971	177 294	183 208	176 505
Pourcentage du regard dirigé vers le sol	72,5 %	79,9 %	82,5 %	79,5 %
Nombre de données après suppression des données aberrantes	142 109	154 575	159 497	168 349
Pourcentage du regard dirigé vers le sol après suppression des données aberrantes	64,0 %	69,6 %	71,8 %	75,8 %

TABLEAU 4.3 – Nombre de données oculométriques utilisées à chaque étape du traitement.

On trace ensuite les diagrammes « boîtes à moustache » des angles calculés pour chaque mode de déplacement (cf. Figure 4.7) (Field, 2013). Puisqu'on cherche à établir un angle d'observation moyen en fonction de la modalité de déplacement, les données se situant au-delà des limites des moustaches sont supprimées³ afin d'éliminer les données potentiellement aberrantes (Field, 2013). Ainsi, pour chaque modalité, on exclut les angles qui ne sont pas dans l'intervalle $[Q_1 - 1.5 \times IQR ; Q_3 + 1.5 \times IQR]$ où Q_1 correspond au 25^{ème} quantile, Q_3 au 75^{ème} quantile, et IQR à l'écart interquartile de la distribution donnée.

Analyse et résultats

La Figure 4.8 montre les distributions des angles d'observation obtenues pour chaque mode de déplacement. Ces distributions ne suivent pas des lois normales selon le test de

3. C'est pour cette raison qu'on peut voir que la distribution des angles semble tronquée sur la Figure 4.8, notamment pour l'automobiliste en interurbain.

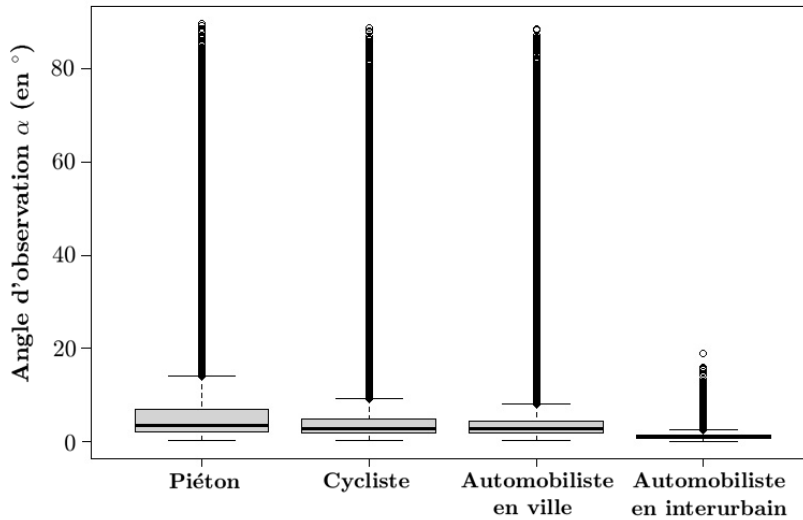


FIGURE 4.7 – Diagramme boîte à moustaches de la répartition des angles d'observation pour chaque modalité de déplacement.

Kolmogorov-Smirnov ($p < 0,05$ pour toutes les distributions). Par conséquent, les analyses statistiques ont été effectuées en utilisant des tests de différence non paramétriques. Le test de la somme des rangs de Wilcoxon a été utilisé pour comparer les modes de déplacement car les tailles d'échantillons comparées étaient inégales (cf. Tableau 4.3). Les résultats de ce test nous permettent d'affirmer que les distributions des angles d'observation sont statistiquement indépendantes ($p < 0.05$ pour tous les tests entre modalités de déplacement). On peut confirmer cette différence significative lorsqu'on calcule les intervalles de confiance à 95 % de l'angle d'observation moyen obtenu pour chaque mode de déplacement (cf. Équation 4.1 et Tableau 4.4) conduisant au non-recouvrement des intervalles.

4.1.2.3 Discussion des résultats

Tout d'abord, dans le Tableau 4.4, on peut remarquer qu'on retrouve un angle moyen égal à 1° pour les automobilistes en interurbain, angle standard défini pour le dimensionnement de l'éclairage routier (CEN, 2015c). Ce résultat nous indique une bonne mise à l'échelle de l'environnement virtuel et vient nous conforter dans la mise en œuvre de l'expérimentation.

De plus, les résultats suggèrent qu'il y a bien un effet significatif du mode de déplacement sur la distance à laquelle l'observateur regarde. On peut voir que l'angle moyen

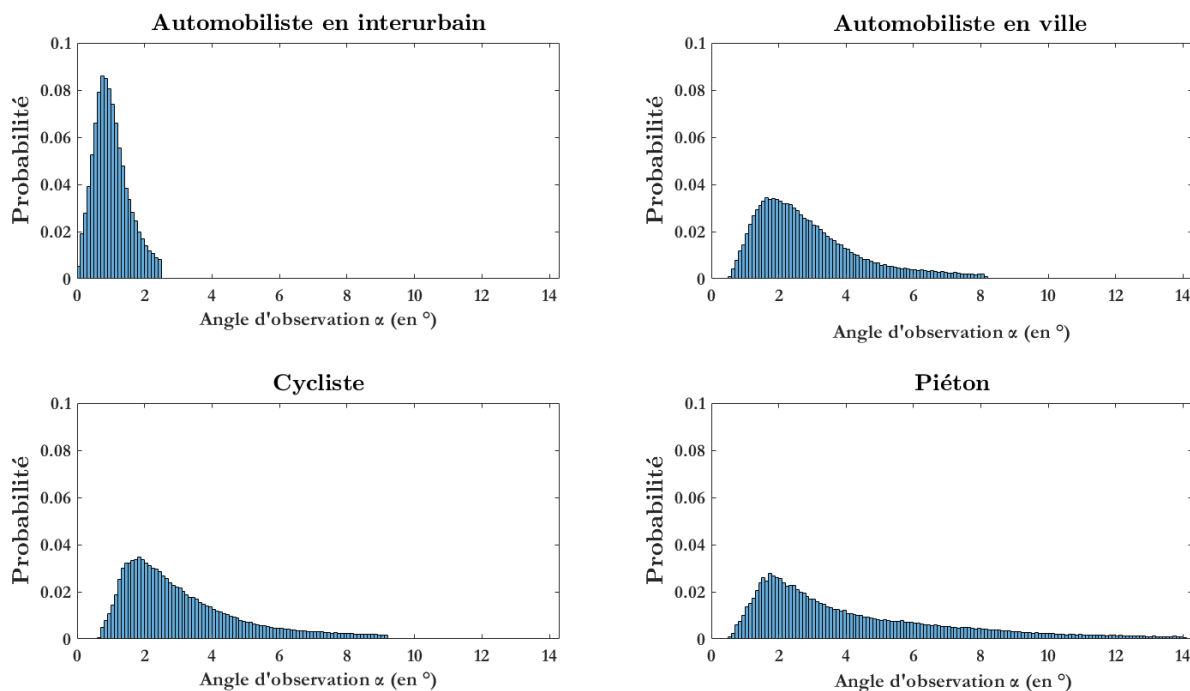


FIGURE 4.8 – Densités de probabilité des angles d’observation α pour chacun des quatre modes de déplacement.

d’observation varie de $1,0^\circ$ pour un automobiliste en interurbain à $4,2^\circ$ pour un piéton en ville. Cela s’explique notamment par la vitesse de déplacement et l’anticipation nécessaire pour détecter de possibles obstacles sur la route ou le trottoir. Plus notre vitesse de déplacement augmente, plus nous avons besoin d’une grande distance pour nous arrêter (Muzet et al., 2020) et donc besoin de regarder loin pour prévoir ce possible arrêt (cf. Tableau 4.4). Par ailleurs, les angles moyens d’observation pour un cycliste ($3,1^\circ$) et un automobiliste en ville ($2,9^\circ$) sont proches mais significativement différents au sens du test statistique.

Le second résultat se trouve dans la distribution des données. En effet, lorsqu’on regarde la dispersion des angles obtenus pour chaque mode de déplacement sur la Figure 4.8, on peut voir qu’en ville les usagers ont tendance à plus balayer le sol devant eux, d’autant plus pour les piétons (angles jusqu’à environ 14° sous l’horizontale), alors qu’un automobiliste sur route interurbaine ne va pas regarder plus près que 34 m devant lui environ (angle maximal égal à $2,5^\circ$). On confirme ce résultat lorsqu’on observe les écarts-types des distributions des angles d’observation qui augmentent lorsque la vitesse diminue (cf. Ta-

Mode de déplacement	Piéton (6 km/h)	Cycliste (12 km/h)	Automobiliste en ville (25 km/h)	Automobiliste en interurbain (75 km/h)
Angle d'observation moyen	4,2°	3,1°	2,9°	1,0°
Écart-type de l'angle d'observation	2,9°	1,8°	1,5°	0,5°
Intervalle de confiance à 95 %	[4,20° ; 4,23°]	[3,12° ; 3,14°]	[2,87° ; 2,89°]	[1,02° ; 1,02°]
Distance au sol correspondante	20,4 m	27,7 m	29,6 m	85,9 m
Temps de réaction moyen	840 ms	715 ms	668 ms	544 ms
Écart-type du temps de réaction	567 ms	372 ms	334 ms	165 ms

TABLEAU 4.4 – Valeurs significatives sur les angles et les temps de réaction pour chaque mode de déplacement.

bleau 4.4). De plus, lorsqu'on calcule le temps de réaction moyen des participants pour chaque mode de déplacement, on peut voir que plus la vitesse augmente, plus le temps de réaction au stimulus visuel diminue (cf. Tableau 4.4). Cela va de pair avec les résultats précédents puisque lorsque notre vitesse augmente, notre champ de vision attentionnel diminue et notre regard est distribué dans une gamme étroite d'angle d'observation. Ainsi, notre attention est concentrée sur une plus petite zone et lorsqu'un stimulus visuel apparaît dans celle-ci alors notre temps de réaction est moindre.

4.1.3 Impact sur les calculs d'éclairage

Nous savons maintenant qu'en fonction de son mode de déplacement, un usager ne regarde pas à la même distance devant lui. Mais cela a-t-il un impact sur les critères de performance des installations d'éclairage ? Pour y répondre, nous avons décidé d'intégrer la possibilité de changer le type d'utilisateur, et donc l'angle d'observation, dans notre logiciel de calcul d'éclairage ESPRIE.

Cependant, un problème se pose avec la grille d'évaluation utilisée habituellement. En effet, on considère normalement l'observateur à 60 m devant la grille puis on évalue la luminance en chaque point de celle-ci. Mais, si on regarde les distances au sol pour le

piéton, le cycliste et l'automobiliste en ville dans le Tableau 4.4, toutes sont inférieures à 30 m et placer l'observateur à 60 m devient donc incohérent. Nous avons donc cherché à savoir à quelle distance de la grille nous devons placer l'observateur.

Pour cela, on a considéré des luminaires espacés de $S = 30$ m puis on a fait en sorte que l'observateur regarde au centre de la zone de mesure c'est-à-dire à 15 m du début de la zone. On a ainsi obtenu la distance d_1 entre l'observateur et le début de la zone (cf. Équation 4.3 et Tableau 4.5). Enfin, on a calculé les angles d'observation α_1 et α_2 obtenus pour le début (d_1) et la fin (d_2) de la zone de mesure ainsi que l'angle moyen α_{moy} qui est la moyenne des angles α calculés pour tous les points du maillage (cf. Équation 4.4 et Tableau 4.5).

$$d_1 = \frac{2 \times H_{yeux} - S \tan \alpha}{2 \tan \alpha} \quad (4.3)$$

$$\alpha = \arctan \left(\frac{H_{yeux}}{D} \right) \quad (4.4)$$

où D est la distance entre l'observateur et le point de mesure et $H_{yeux} = 1,5$ m la hauteur des yeux de l'observateur.

Angle d'observation α	d_1	d_2	α_1	α_2	α_{moy}
1,0°	70,9 m	100,9 m	1,21°	0,85°	1,01°
2,9°	14,6 m	44,6 m	5,86°	1,93°	3,19°
3,1°	12,7 m	42,7 m	6,74°	2,01°	3,46°
4,2°	5,4 m	35,4 m	15,45°	2,42°	5,31°

TABLEAU 4.5 – Distances et angles d'observation correspondants à la zone de mesure lors d'un changement de type d'usager.

On remarque dans le Tableau 4.5 que plus l'angle d'observation α augmente, plus l'amplitude des valeurs de α prises entre le début et la fin du maillage est importante. De plus, lorsqu'on regarde l'angle moyen α_{moy} , on observe qu'il correspond de moins en moins à la géométrie d'observation recherchée. La méthodologie classique de l'observateur fixe regardant entre d_1 et d_2 devant lui nous semble donc inadaptée aux calculs d'éclairage avec un changement de géométrie d'observation. Pour cette raison, nous proposons de mettre en œuvre le concept d'observateur mobile proposé par Stockmar (2015).

Les positions des points de mesure restent les mêmes entre deux luminaires. Il s’agit ensuite de fixer l’angle d’observation puis de déplacer l’observateur de telle sorte que la distance longitudinale le séparant du point de maillage considéré soit toujours la même. Le maillage final est reconstitué à partir des positions successives de l’observateur et les critères de qualité peuvent être évalués de la même manière que pour un observateur fixe (cf. Figure 4.9).

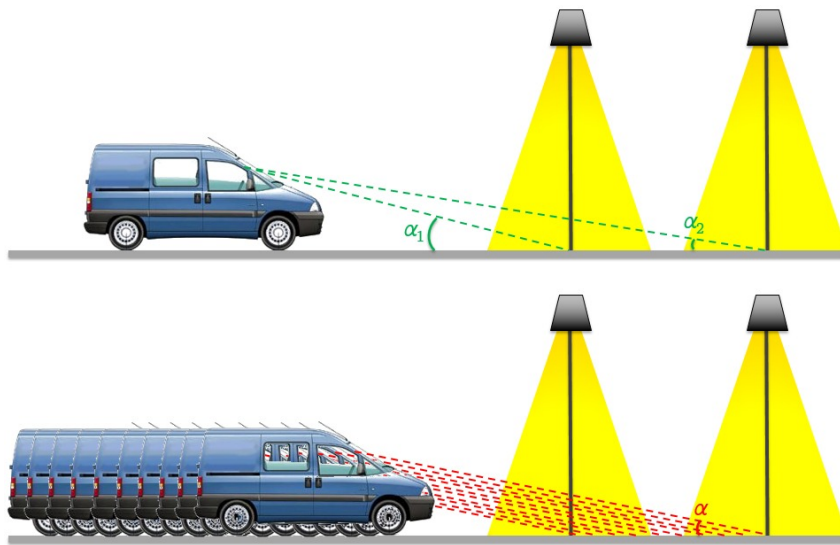


FIGURE 4.9 – Observateur fixe *vs.* observateur mobile d’après Greffier (2022).

4.2 Nouvelles géométries d’observation

4.2.1 Simulation pour de nouveaux angles d’observation

Afin d’étudier l’impact d’un changement de géométrie d’observation, on décide d’évaluer par simulation les performances d’une installation d’éclairage pour différents types d’usagers. On garde un angle α de 1° pour les automobilistes sur route interurbaine. On choisit ensuite d’attribuer un angle d’observation égal à 3° pour les automobilistes en ville et les cyclistes, angle qui a également été proposé par Stockmar (2015). Enfin, en suivant l’incrément de 2° , on obtient un angle α de 5° pour le piéton ce qui rejoint les recommandations du projet EMPIR SURFACE (Muzet et al., 2020) et reste proche de nos résultats précédents. Le concept d’observateur mobile est mis en œuvre pour les angles d’observation supérieurs à 1° . Afin de vérifier que l’utilisation de celui-ci n’induit pas

d'erreur, on calcule les critères de qualité avec un observateur mobile qui regarde à $1,43^\circ$ sous l'horizontale. On garde ainsi une distance D de 60 m entre l'observateur et le point de mesure (cf. Équation 4.4) ce qui s'accorde avec la géométrie standard de l'observateur fixe et permet donc une comparaison.

Pour cette étude, on considère le second site expérimental qui a été décrit dans la Section 3.5. Pour chaque géométrie d'observation, l'éclairement horizontal, l'éclairement vertical à 12,5 cm du sol, la luminance moyenne, les uniformités générale et longitudinale, le *threshold increment* et le niveau de visibilité sont calculés pour un observateur en milieu de voie lente. Les tableaux détaillés des résultats sont donnés en Annexe A.2. On résume dans le Tableau 4.6 les valeurs des critères de qualité obtenues pour chaque angle d'observation.

Angle α	L_{moy} (en cd.m^{-2})	U_0	U_l	f_{TI}	$ VL > 7$
1°	0,95	0,44	0,72	9,5 %	86,67 %
$1,43^\circ$	0,95	0,43	0,72	9,1 %	93,33 %
3°	0,76	0,43	0,71	9,2 %	91,67 %
5°	0,70	0,43	0,71	8,2 %	91,67 %

TABLEAU 4.6 – Critères de qualité calculés par simulation pour différentes géométries d'observation.

Tout d'abord, on observe que les critères de qualité standards obtenus pour l'observateur fixe à 1° et l'observateur mobile à $1,43^\circ$ sont quasiment identiques. Cela confirme que l'on peut utiliser l'observateur mobile lorsqu'on évalue une installation d'éclairage avec un angle d'observation supérieur à 1° . Aussi, pour cet angle, malgré de bonnes uniformités et un critère d'éblouissement d'incapacité correct, on obtient une luminance moyenne inférieure à $1,00 \text{ cd.m}^{-2}$, nous indiquant que le flux des luminaires devrait être augmenté pour satisfaire les recommandations de la norme EN 13201 (CEN, 2015b).

Par ailleurs, on remarque que la luminance moyenne de la chaussée baisse lorsque l'angle d'observation augmente sans pour autant affecter les uniformités, ce qui rejoint les résultats trouvés par Greffier et al. (2021). On explique cette décroissance par la réduction de la capacité de réflexion du revêtement lorsque l'angle d'observation augmente. Comme le montre la Figure 4.10, le volume des sphères diminue lorsque l'angle d'observation augmente, ce qui se traduit par une décroissance de Q_0 .

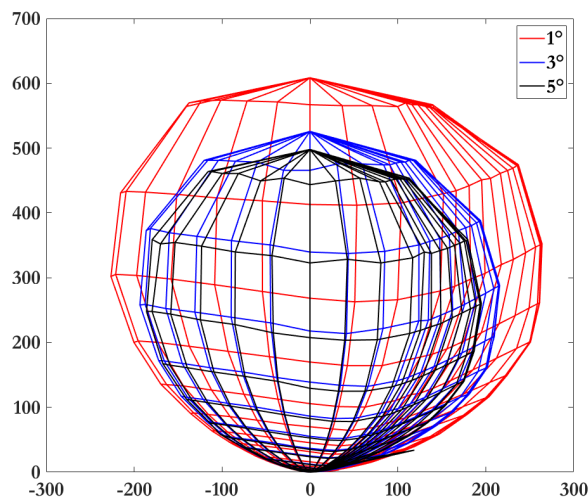


FIGURE 4.10 – Solides photométriques du revêtement du second site expérimental pour $\alpha = 1^\circ, 3^\circ$ et 5° .

Cependant, on peut voir que la diminution de la luminance moyenne n'affecte pas la visibilité des usagers puisque le pourcentage de cibles visibles ne diminue pas, il augmente même. On explique notamment cela par le fait que, comme l'observateur regarde moins loin, la taille apparente de la cible devient plus importante. Enfin, on constate que le *threshold increment* diminue ce qui s'explique par une excentricité des sources qui augmente quand l'angle d'observation augmente.

Ces résultats nous montrent l'effet d'un changement de géométrie sur les critères de qualité d'une installation d'éclairage et par conséquent la nécessité de considérer correctement les usagers de l'espace public lors de son aménagement. Aussi, le critère de visibilité nous permet de souligner qu'une luminance plus faible, lorsque l'angle d'observation augmente, ne porte pas préjudice à la visibilité des usagers.

4.2.2 Mesures sur site avec les nouveaux angles

Pour examiner l'effet d'un changement d'angle d'observation sur les performances d'une installation d'éclairage en situation réelle, nous avons effectué des mesures d'éclairement et de luminance sur le second site expérimental (cf. description en Section 3.5). De même qu'en simulation, nous avons considéré un observateur fixe pour $\alpha = 1^\circ$ et un observateur mobile pour les angles d'observation de $1,43^\circ, 3^\circ$ et 5° . Les mesures ont été réalisées pour la voie lente uniquement et sont détaillées en Annexe A.2. Le Tableau 4.7 donne les valeurs

des critères de qualité obtenues pour chaque angle d'observation.

Angle α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	$ VL > 7$
1°	1,16	0,63	0,76	100,00 %
1,43°	1,07	0,62	0,74	100,00 %
3°	0,86	0,60	0,72	100,00 %
5°	0,69	0,65	0,73	100,00 %

TABLEAU 4.7 – Critères de qualité mesurés sur une voie pour différentes géométries d'observation.

Les conclusions sont les mêmes que pour l'étude réalisée en simulation dans la section précédente. Premièrement, les résultats obtenus pour l'observateur fixe à 1° et l'observateur mobile à 1,43° sont similaires, ce qui valide la possibilité d'utiliser l'observateur mobile lorsqu'on évalue une installation d'éclairage avec un angle d'observation supérieur à 1°. De plus, on observe de nouveau une diminution de la luminance moyenne lorsque l'angle d'observation augmente, sans dégradation de la visibilité. Les uniformités de luminance quant à elles restent stables.

4.2.3 Confrontation entre simulation et mesure

Afin de valider notre logiciel de calcul d'éclairage suite à l'ajout de la possibilité de changer le type d'utilisateur, nous décidons de comparer les résultats obtenus dans la Section 4.2.2 avec ceux obtenus par simulation. Pour cela, on reprend les résultats de la simulation effectuée en Section 4.2.1 (cf. Annexe A.2) mais on ne considère plus que les valeurs obtenues pour la voie lente. Les critères de qualité déduits pour chaque angle d'observation sont donnés dans le Tableau 4.8.

Angle α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	$ VL > 7$
1°	1,22	0,78	0,72	100,00 %
3°	0,98	0,76	0,71	100,00 %
5°	0,89	0,74	0,71	100,00 %

TABLEAU 4.8 – Critères de qualité calculés sur une voie par simulation pour différentes géométries d'observation.

Tout d’abord, lorsqu’on observe les critères de performance classiques, on peut remarquer des différences, notamment pour la luminance moyenne et l’uniformité générale. Deux facteurs peuvent en être à l’origine : les paramètres des luminaires et les propriétés de réflexion du revêtement. Premièrement, on remarque en Annexe A.2 que les éclairagements horizontaux et verticaux ne sont pas les mêmes en mesure et en simulation. Cela peut être dû à des paramètres utilisés en simulation qui ne sont pas identiques à la réalité tels que le flux ou la photométrie des luminaires. Ces paramètres n’ayant pas pu être vérifiés par la mesure, on a utilisé les données constructeur. Par ailleurs, lors des simulations, nous utilisons les tables- r provenant d’une unique carotte de chaussée. Cela ne nous permet pas de prendre en compte l’hétérogénéité de la surface de la route sur l’ensemble de la zone de mesure et pourrait donc expliquer les différences de luminance trouvées (Greffier et al., 2021).

Cependant, malgré les écarts, on retrouve les mêmes tendances. Plus l’observateur regarde près de lui, plus la luminance moyenne perçue diminue sans modifier la visibilité. En effet, quel que soit l’angle d’observation, la totalité des cibles sont considérées visibles, résultat que nous avons également trouvé par la mesure sur site. Ces similarités confirment de nouveau la nécessité d’ajouter des calculs de visibilité lors d’un dimensionnement d’éclairage urbain. En effet, voyant que la luminance moyenne sur la surface de la route diminue quand l’angle d’observation augmente, on pourrait penser qu’il faille augmenter le flux des luminaires pour compenser. Or, le calcul du niveau de visibilité nous montre que cette baisse de luminance ne semble pas problématique pour les usages urbains.

4.3 Adaptation des recommandations

Aujourd’hui, les éclairagistes dimensionnent les installations d’éclairage en prenant en compte un observateur fixe qui regarde le sol avec un angle d’observation de 1° comme le recommande les standards (CEN, 2015c; CIE, 2019b). Or, nous venons de voir qu’un angle α de 3° serait plus approprié aux usages urbains et nécessite de mettre en œuvre les calculs d’éclairage avec un observateur mobile.

Cependant, nous sommes conscients de deux choses. L’une, tout d’abord, est que les éclairagistes ne disposent que très rarement d’une table- r du revêtement de la chaussée,

et que, s'ils en ont une, elle est mesurée pour un angle d'observation de 1° et non 3° . Par ailleurs, les logiciels d'éclairage ne proposent actuellement pas la possibilité de modifier l'angle d'observation. Nous pouvons donc penser que l'estimation des performances d'une installation d'éclairage urbain n'est pas encore prête d'être réalisée avec un angle α de 3° . De plus, les éclairagistes utilisent des logiciels de dimensionnement qu'ils n'ont, pour la plupart, pas développé et qui n'incluent donc pas de calculs de VL . Il est donc clair que la visibilité ne sera jamais évaluée elle non plus, au moins tant que les pratiques n'auront pas évolué.

La question que nous nous sommes posés a donc été la suivante : comment faire pour utiliser nos résultats sans pouvoir révolutionner les pratiques et méthodologies actuelles ? Dans un premier temps, il nous a semblé nécessaire de vérifier qu'un dimensionnement d'éclairage urbain avec un angle α de 1° ne posait pas de problème de sécurité pour les usagers regardant à 3° . On s'intéresse plus particulièrement aux classes d'éclairage M3, M4 et M5 car ce sont les plus répandues en urbain (cf. Tableau 2.4).

À cette fin, pour différents couples revêtement/éclairage, on va chercher le flux des luminaires permettant de répondre aux exigences spécifiées pour chacune des classes d'éclairage et évaluer la visibilité. On va ensuite garder ce même flux et évaluer les performances obtenues pour un observateur mobile avec un angle α de 3° .

Les simulations sont réalisées en considérant l'installation d'éclairage de la Section 2 du site Lumiroute® (cf. Section 3.2.2) associée tour à tour à chacun des quatre revêtements de ce même site, et le couple revêtement/éclairage du second site expérimental (cf. Section 3.5). Pour chacun des cinq revêtements, on dispose des tables- r pour les angles d'observation de 1° et 3° .

On s'intéresse tout d'abord à la classe d'éclairage M3. Pour chacun des cinq couples revêtement/éclairage, on fait varier le flux des luminaires jusqu'à obtenir une luminance moyenne $L_{moy} = 1,00 \text{ cd.m}^{-2}$ tout en ayant au minimum des uniformités $U_0 = 0,40$ et $U_l = 0,60$ et un facteur d'éblouissement maximal $f_{TI} = 15 \%$. Les valeurs des critères de qualité obtenues pour chaque couple sont données dans le Tableau 4.9. On évalue également le pourcentage de cibles visibles et on remarque que celui-ci n'est pas toujours égal à 100% malgré des critères de performance qui répondent aux exigences.

Sec. 1	Flux : 4150 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	1,00	0,54	0,79	3,3	98,33 %
		3°	0,87	0,55	0,76	3,1	100,00 %
Sec. 2	Flux : 4450 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	1,00	0,60	0,83	3,5	100,00 %
		3°	0,82	0,61	0,81	3,5	100,00 %
Sec. 3	Flux : 5800 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	1,00	0,60	0,84	4,6	93,33 %
		3°	0,83	0,60	0,84	4,5	100,00 %
Sec. 4	Flux : 5550 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	1,00	0,57	0,88	4,4	91,67 %
		3°	0,83	0,58	0,88	4,3	100,00 %
Site 2	Flux : 5000 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	1,00	0,44	0,72	9,6	86,67 %
		3°	0,80	0,43	0,71	9,3	100,00 %

TABLEAU 4.9 – Résultats de simulation pour cinq couples revêtement/éclairage dimensionnés pour répondre aux exigences d'une classe M3.

On estime ensuite les différents critères pour un observateur mobile regardant à 3° sous l'horizontale avec les flux précédemment trouvés. Tout d'abord, on peut voir que la luminance moyenne diminue (de 17 % en moyenne) pour les cinq situations lorsque l'angle d'observation augmente. Cela n'affecte pas les uniformités puisqu'elles restent les mêmes. Aussi, on observe que le facteur d'éblouissement d'incapacité est le même pour $\alpha = 1^\circ$ et $\alpha = 3^\circ$. Enfin, pour les cinq situations évaluées avec un angle de 3°, la totalité des cibles sont considérées visibles. Lorsqu'on compare la visibilité à 3° avec celle obtenue à 1°, on voit que les pourcentages de cibles visibles sont supérieurs ou égaux quelle que soit la situation simulée.

On fait de même pour la classe d'éclairage M4. Cette fois, on cherche à avoir $L_{moy} = 0,75$ cd.m⁻², $U_0 = 0,40$, $U_l = 0,60$ et $f_{TI} = 15$ % pour un angle d'observation égal à 1°. Les valeurs des critères de qualité obtenues pour chaque couple revêtement/éclairage sont données dans le Tableau 4.10.

Comme pour la classe M3, on observe une diminution moyenne de 17 % de la luminance moyenne. Les uniformités et le facteur d'éblouissement sont de nouveau stables. Également, la visibilité n'est jamais diminuée puisqu'on remarque que les pourcentages

Sec. 1	Flux : 3125 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,75	0,54	0,79	3,1	96,67 %
		3°	0,65	0,55	0,76	2,9	100,00 %
Sec. 2	Flux : 3350 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,75	0,60	0,83	3,3	96,67 %
		3°	0,62	0,61	0,81	3,3	100,00 %
Sec. 3	Flux : 4350 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,75	0,60	0,84	4,4	90,00 %
		3°	0,62	0,60	0,84	4,2	100,00 %
Sec. 4	Flux : 4150 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,75	0,57	0,88	4,2	88,33 %
		3°	0,62	0,58	0,88	4,1	100,00 %
Site 2	Flux : 3750 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,75	0,44	0,72	9,1	85,00 %
		3°	0,60	0,43	0,71	8,8	100,00 %

TABLEAU 4.10 – Résultats de simulation pour cinq couples revêtement/éclairage dimensionnés pour répondre aux exigences d'une classe M4.

de cibles visibles pour $\alpha = 3^\circ$ sont toujours égaux à 100,00 % et donc supérieurs à ceux obtenus pour $\alpha = 1^\circ$.

Enfin, on effectue des simulations pour la classe d'éclairage M5. On règle donc le flux pour atteindre $L_{moy} = 0,50$ cd.m⁻², $U_0 = 0,35$, $U_l = 0,40$ et $f_{TI} = 15$ %. Les valeurs des critères de qualité obtenues pour les cinq situations sont données dans le Tableau 4.11.

La luminance moyenne calculée pour un observateur regardant à 3° sous l'horizontale est de nouveau environ 17 % inférieure à celle estimée pour $\alpha = 1^\circ$. De leur côté, les uniformités et le *threshold increment* ne varient quasiment pas. Enfin, on remarque que le pourcentage de cibles visibles n'est pas toujours égal à 100 % comme pour les simulations pour les classes M3 et M4. Cependant, il est toujours supérieur à celui trouvé pour 1° ce qui indique qu'on ne perd pas en visibilité.

Ces résultats nous permettent de dire qu'en utilisant la méthodologie classique ($\alpha = 1^\circ$) pour dimensionner une installation d'éclairage en ville, un éclairagiste qui atteint les valeurs préconisées apporte assez de visibilité aux usagers pour assurer leur sécurité, même si ceux-ci regardent plutôt avec un angle d'observation de 3° .

Sec. 1	Flux : 2100 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,50	0,54	0,79	2,9	93,33 %
		3°	0,44	0,55	0,76	2,7	100,00 %
Sec. 2	Flux : 2225 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,50	0,60	0,83	3,1	95,00 %
		3°	0,41	0,61	0,81	3,0	100,00 %
Sec. 3	Flux : 2900 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,50	0,60	0,84	4,0	83,33 %
		3°	0,42	0,60	0,84	3,9	100,00 %
Sec. 4	Flux : 2750 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,50	0,57	0,88	3,8	85,00 %
		3°	0,41	0,58	0,88	3,8	100,00 %
Site 2	Flux : 2500 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,50	0,44	0,72	8,3	80,00 %
		3°	0,40	0,43	0,72	7,3	98,33 %

TABLEAU 4.11 – Résultats de simulation pour cinq couples revêtement/éclairage dimensionnés pour répondre aux exigences d'une classe M5.

Pour aller plus loin, nous avons pu remarquer que le pourcentage de cibles visibles avec un angle d'observation de 3° est toujours supérieur ou égal à celui déterminé avec 1°. Aussi, même si la luminance à 3° diminue déjà, cela nous laisse penser qu'on pourrait peut-être la diminuer encore plus, en abaissant le flux des luminaires sans pénaliser la visibilité en ville. C'est pourquoi, dans le contexte actuel de transition écologique et donc d'économies d'énergie, nous aimerions examiner un déclassement d'un rang pour le dimensionnement de l'éclairage en ville. Par exemple, cela consisterait pour une chaussée urbaine catégorisée M3 pour une observation à 1°, à répondre aux exigences de la classe M4 quand on souhaite satisfaire aux besoins visuels à 3°.

Afin de voir si notre proposition n'est pas trop optimiste, nous avons regardé, pour chaque couple revêtement/éclairage, si le déclassement d'un rang lors du dimensionnement à 1° apporte ou non une diminution de la visibilité pour des usages urbains à 3°.

On s'intéresse tout d'abord aux deux premiers couples revêtement/éclairage, c'est-à-dire qu'on simule l'installation d'éclairage de la section 2 du site Lumiroute® avec les revêtements de la section 1 et de la section 2. Premièrement, on règle le flux pour répondre aux exigences de la classe M3 puis de la classe M4 et on regarde les performances qui en

résultent pour un angle d'observation de 3° . On peut voir que la luminance moyenne diminue pour les deux situations mais que les uniformités et le pourcentage de cibles visibles restent les mêmes⁴ (cf. Tableaux 4.12 et 4.13). Le facteur d'éblouissement d'incapacité se réduit de 0,2 %.

On regarde ensuite l'impact d'un déclassement de M4 à M5. De nouveau, la luminance moyenne diminue, sans affecter les uniformités et la visibilité qui reste à 100 %. Le facteur f_{TI} diminue lui aussi un peu.

Enfin, on évalue les performances obtenues si on avait dimensionné pour répondre aux exigences d'une classe M6 au lieu d'une classe M5. Pour un angle d'observation de 3° , la luminance moyenne devient égale à $0,26 \text{ cd.m}^{-2}$ pour la situation 1 et $0,25 \text{ cd.m}^{-2}$ pour la situation 2 alors qu'elle était de $0,44 \text{ cd.m}^{-2}$ et $0,41 \text{ cd.m}^{-2}$ respectivement pour un dimensionnement répondant à la classe M5. Cependant, cette diminution n'altère pas la visibilité puisque le pourcentage de cibles visibles reste maximal. De même, les uniformités restent inchangés.

M3	Flux : 4150 lumens	α	L_{moy} (en cd.m^{-2})	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	1,00	0,54	0,79	3,3	98,33 %
		3°	0,87	0,55	0,76	3,1	100,00 %
M4	Flux : 3125 lumens	α	L_{moy} (en cd.m^{-2})	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,75	0,54	0,79	3,1	96,67 %
		3°	0,65	0,55	0,76	2,9	100,00 %
M5	Flux : 2100 lumens	α	L_{moy} (en cd.m^{-2})	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,50	0,54	0,79	2,9	93,33 %
		3°	0,44	0,55	0,76	2,7	100,00 %
M6	Flux : 1250 lumens	α	L_{moy} (en cd.m^{-2})	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,30	0,54	0,79	2,6	83,33 %
		3°	0,26	0,55	0,76	2,5	100,00 %

TABLEAU 4.12 – Résultats de simulation pour différentes classes d'éclairage en considérant l'installation d'éclairage de la section 2 Lumiroute® et le revêtement de la section 1 Lumiroute®.

4. Ce qui est logique puisque l'abaissement de flux ne change pas la répartition de la lumière sur la route et ne modifie donc pas les uniformités.

M3	Flux : 4450 lumens	α	L_{moy} (en $cd.m^{-2}$)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	1,00	0,60	0,83	3,5	100,00 %
		3°	0,82	0,61	0,81	3,5	100,00 %
M4	Flux : 3350 lumens	α	L_{moy} (en $cd.m^{-2}$)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,75	0,60	0,83	3,3	96,67 %
		3°	0,62	0,61	0,81	3,3	100,00 %
M5	Flux : 2225 lumens	α	L_{moy} (en $cd.m^{-2}$)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,50	0,60	0,83	3,1	95,00 %
		3°	0,41	0,61	0,81	3,0	100,00 %
M6	Flux : 1350 lumens	α	L_{moy} (en $cd.m^{-2}$)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,30	0,60	0,83	2,8	86,67 %
		3°	0,25	0,61	0,81	2,8	100,00 %

TABLEAU 4.13 – Résultats de simulation pour différentes classes d'éclairage en considérant l'installation d'éclairage de la section 2 Lumiroute® et le revêtement de la section 2 Lumiroute®.

Ces deux premières situations nous confirment la possibilité d'un déclassement d'un rang et nous laissent même penser qu'un décalage de plus d'une classe serait envisageable. Cependant, nous rappelons que les deux revêtements simulés sont des revêtements plutôt clairs accentuant donc la visibilité des cibles. De plus, ils ne sont que moyennement répandus en ville du fait de leur coût, plus onéreux que les revêtements classiques sombres.

On réalise ensuite les mêmes études pour les revêtements des sections 3 et 4 du site Lumiroute® qui sont des revêtements plutôt noirs (cf. Tableaux 4.14 et 4.15). Lorsqu'on regarde l'effet des déclassements de M3 à M4 et de M4 à M5, on obtient les mêmes conclusions que pour les deux premières situations. On observe que seuls la luminance moyenne et le facteur d'éblouissement diminuent. La visibilité reste inchangée, tout comme les uniformités.

On s'intéresse ensuite au déclassement de M5 à M6. On retrouve les mêmes conséquences qu'auparavant mise à part pour la visibilité. En effet, pour les deux couples revêtement/éclairage, le pourcentage de cibles visibles est de 100 % pour la classe M5 et est inférieur pour la classe M6 (95,00 % pour la situation 3 et 96,67 % pour la situation 4). Cela indique une diminution de la visibilité lors du déclassement pour un angle d'observation de 3°. Malgré cela, le pourcentage de cibles visibles reste supérieur à celui obtenu pour la classe M5 avec l'observateur standard regardant avec un angle α de 1° (83,33 %

M3	Flux : 5800 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	1,00	0,60	0,84	4,6	93,33 %
3°	0,83	0,60	0,84	4,5	100,00 %		
M4	Flux : 4350 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,75	0,60	0,84	4,4	90,00 %
3°	0,62	0,60	0,84	4,2	100,00 %		
M5	Flux : 2900 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,50	0,60	0,84	4,0	83,33 %
3°	0,42	0,60	0,84	3,9	100,00 %		
M6	Flux : 1750 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,30	0,60	0,84	3,6	76,67 %
3°	0,25	0,60	0,84	3,5	95,00 %		

TABLEAU 4.14 – Résultats de simulation pour différentes classes d'éclairage en considérant l'installation d'éclairage de la section 2 Lumiroute® et le revêtement de la section 3 Lumiroute®.

M3	Flux : 5550 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	1,00	0,57	0,88	4,4	91,67 %
3°	0,83	0,58	0,88	4,3	100,00 %		
M4	Flux : 4150 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,75	0,57	0,88	4,2	88,33 %
3°	0,62	0,58	0,88	4,1	100,00 %		
M5	Flux : 2750 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,50	0,57	0,88	3,8	85,00 %
3°	0,41	0,58	0,88	3,8	100,00 %		
M6	Flux : 1650 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,30	0,57	0,88	3,5	76,67 %
3°	0,25	0,58	0,88	3,4	96,67 %		

TABLEAU 4.15 – Résultats de simulation pour différentes classes d'éclairage en considérant l'installation d'éclairage de la section 2 Lumiroute® et le revêtement de la section 4 Lumiroute®.

pour la situation 3 et 85,00 % pour la situation 4).

Pour finir, on réalise la même étude pour le couple revêtement/éclairage du second site expérimental. L'impact d'un déclassement de M3 à M4 reste le même que pour les autres situations : la luminance moyenne et le facteur d'éblouissement diminuent sans aucun effet sur le pourcentage de cibles visibles (cf. Tableau 4.16).

M3	Flux : 5000 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	1,00	0,44	0,72	9,6	86,67 %
		3°	0,80	0,43	0,71	9,3	100,00 %
M4	Flux : 3750 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,75	0,44	0,72	9,1	85,00 %
		3°	0,60	0,43	0,71	8,8	100,00 %
M5	Flux : 2500 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,50	0,44	0,72	8,3	80,00 %
		3°	0,40	0,43	0,72	8,1	98,33 %
M6	Flux : 1500 lumens	α	L_{moy} (en cd.m ⁻²)	U_0	U_l	f_{TI} (en %)	$ VL > 7$
		1°	0,30	0,44	0,72	7,5	68,33 %
		3°	0,24	0,43	0,71	7,3	93,33 %

TABLEAU 4.16 – Résultats de simulation pour différentes classes d'éclairage en considérant l'installation d'éclairage et le revêtement du second site expérimental.

Lorsqu'on regarde l'effet du déclassement de M4 à M5, on voit que la luminance moyenne évolue de 0,60 cd.m⁻² à 0,40 cd.m⁻² et que le facteur d'éblouissement diminue de 0,7 %, ce qui est également le cas de la visibilité. Cette dernière est de 100 % pour la classe M4 et devient égale à 98,33 % pour la classe M5. Le pourcentage de cibles visibles obtenu pour la classe M5 avec un angle d'observation de 3° reste tout de même supérieur à celui calculé pour un dimensionnement répondant aux exigences de la classe M4 avec un observateur standard (85 %).

Enfin, on s'intéresse au déclassement de M5 à M6. Celui-ci fait diminuer la luminance moyenne de 0,40 cd.m⁻² à 0,24 cd.m⁻². Le facteur d'éblouissement est également réduit. Par ailleurs, le pourcentage de cibles visibles diminue de 5 %, passant de 98,33 % pour la classe M5 à 93,33 % pour la classe M6. Malgré cela, il reste supérieur à la visibilité obtenue pour la classe M5 avec l'observateur regardant avec un angle α de 1° (80,00 %).

Dans cette section, nous avons calculé les critères de qualité obtenus pour cinq couples revêtement/éclairage avec en ligne de mire une proposition d'abaissement des niveaux de luminance exigés fondées sur le maintien de la performance visuelle. Les cinq situations nous ont confirmé qu'il était possible d'effectuer un déclassement de la classe M3 à la classe M4 sans aucun impact sur les uniformités et la visibilité, et avec une diminution de l'éblouissement d'incapacité.

Aussi, les trois dernières situations ont montré qu'un déclassement de M4 à M5 ou de M5 à M6 pouvait avoir un léger impact sur la visibilité. Cependant, celui-ci n'est au maximum qu'une diminution de 5 % du pourcentage de cibles visibles. De plus, on considère cette diminution acceptable puisque le pourcentage de cibles visibles est toujours supérieur d'au moins 10 % à celui obtenu pour un dimensionnement classique selon la classe inférieure avec $\alpha = 1^\circ$.

Ainsi, sur la base des résultats obtenus pour ces cinq situations, nous pensons qu'il serait intéressant d'approfondir nos études sur la possibilité d'un déclassement d'un rang pour la catégorie M lors du dimensionnement d'une installation d'éclairage en ville, afin de traduire les opportunités offertes par une évolution de la géométrie d'observation. Nous envisageons donc de confirmer les tendances obtenues en simulant les performances obtenues avec d'autres couples revêtement/éclairage et en organisant des expérimentations avec sujets. Le déclassement d'un rang permettrait des économies d'énergie de 25 % pour un déclassement de M3 à M4, de 33 % pour M4 à M5, et de 40 % pour M5 à M6, par rapport à un dimensionnement classique.

Ce quatrième chapitre s'est concentré sur la visibilité des usagers en milieu urbain. Nous avons tout d'abord effectué une expérimentation en réalité virtuelle afin de savoir où nous regardons lors de nos déplacements en ville. Celle-ci nous a permis d'en déduire des angles d'observation pour chaque type d'usagers. Ces nouveaux angles d'observation ont ensuite été intégrés au logiciel de calcul pour évaluer l'impact du changement de la géométrie d'observation sur les critères de qualité d'une installation d'éclairage et sur le critère de visibilité. Des mesures sur site expérimental ont également été réalisées et une comparaison entre simulations et mesures a été faite. Nous avons ainsi montré que l'augmentation de l'angle d'observation induit une diminution de la luminance moyenne perçue par l'observateur mais que, malgré cela, la visibilité n'est pas affectée. Cela nous

a alors amené à proposer des adaptations des recommandations actuelles : l'utilisation d'un observateur mobile lorsqu'on considère un angle d'observation supérieur à 1° et le déclassement d'un rang lorsqu'on dimensionne une installation d'éclairage en ville de façon standard (c'est-à-dire avec $\alpha = 1^\circ$). Pour faire suite à ces évolutions, le prochain chapitre expose des études exploratoires menées dans le domaine de l'aménagement urbain.

TRAVAUX EXPLORATOIRES

La couleur des revêtements routiers contribue à la perception des espaces publics. De jour, de nouveaux types de matériaux de couleurs différentes peuvent améliorer la lisibilité de l'espace urbain en matérialisant au sol les espaces dédiés aux différents usages. De nuit, un revêtement de couleur claire peut réduire la consommation d'énergie pour l'éclairage. Cependant, la couleur est très rarement prise en compte dans la conception des aménagements urbains. Il n'existe pas de méthodologie standard pour l'évaluation de la couleur des chaussées et son évolution dans le temps n'est jamais évaluée. Nous nous sommes donc intéressés, dans la première partie de ce chapitre, à la colorimétrie des revêtements routiers. On y expose une étude sur l'évolution de la couleur des revêtements due au vieillissement naturel puis des réflexions sont faites sur la possibilité d'une corrélation entre la coordonnée L^* dans l'espace CIELAB et l'albédo d'un revêtement.

Par ailleurs, comme nous le disions en section 2.3, l'utilisation du numérique permet aux villes de cibler les besoins et cas d'usages pertinents pour la planification urbaine. La simulation d'environnements aide à la visualisation de l'espace. Il serait donc intéressant que notre logiciel d'estimation des performances d'installations d'éclairage en soit doté. Un tel outil permettrait aux clients de l'entreprise Spie batignolles malet de mieux s'imaginer leur environnement après travaux par exemple ou bien de comparer différentes propositions et d'en évaluer les performances.

De plus, dans le chapitre précédent (cf. Section 4.3), nous faisons la proposition d'un déclassement d'un rang pour les classes d'éclairage M lors d'un dimensionnement en urbain. Cette proposition nécessite d'être confirmée par le biais d'une expérimentation avec sujets notamment. Celle-ci pourrait être réalisée en réalité virtuelle (RV) de telle sorte que nous soyons en capacité de contrôler tous les paramètres influents et d'assurer les mêmes conditions d'expérimentation à tous les sujets. Cela nécessite donc de disposer d'un environnement virtuel dans lequel nous serions capable de régler les paramètres d'éclairage et

de réflexion des revêtements et dans lequel nous pourrions ensuite évaluer les performances des installations d'éclairage selon le type d'utilisateur.

Afin d'évaluer cette possibilité, une étude exploratoire a été menée avec le moteur de jeu Unity 3D et est décrite dans la seconde partie de ce chapitre. Nous avons essayé de voir si la simulation d'installation d'éclairage et de revêtement routier se faisait de façon physiquement réaliste et s'il était possible de reproduire une chaussée et son installation d'éclairage avec tous les paramètres dont nous disposons habituellement (cf. Section 3.1.1).

5.1 Colorimétrie

5.1.1 Évolution de la couleur des revêtements

Le groupe de travail « Revêtements et Lumière » est composé de maîtres d'ouvrage, d'associations¹ et de syndicats professionnels d'éclairagistes² et de constructeurs de routes³, d'organismes de recherche publics et privés⁴ et de consultants experts. Le groupe a d'abord organisé et suivi des démonstrateurs et des opérations sur des sites réels pour montrer la pertinence des enjeux et des concepts de l'éclairage optimal (Abdo et al., 2010; Christory et al., 2014). Il a ensuite élaboré une bibliothèque de chaussées urbaines actuelles et innovantes disponibles sur le marché pour :

- faciliter le choix des décideurs,
- développer des outils et des méthodes pour les gestionnaires, les concepteurs d'éclairage et les constructeurs de routes afin d'optimiser l'éclairage dans les zones urbaines et interurbaines.

Ce panel de chaussées urbaines comprend des chaussées bitumineuses, des chaussées en béton de ciment et des pierres naturelles. Une caractérisation complète de ce large panel de chaussées a été réalisée à l'état initial (T0) et après 30 mois de vieillissement naturel

1. AITF (Association des Ingénieurs Territoriaux de France).

2. AFE (Association Française de l'Éclairage).

3. Office des Asphaltes, ROUTES DE FRANCE, SPECBEA (Spécialistes de la Chaussée en Béton Et des Aménagements), CIMbéton (Centre d'information sur le ciment et ses applications), EUROBITUME

4. Cerema (Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement), CERIB (Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton), CTMNC (Centre Technique des Matériaux Naturels de Construction).

(T30) (Muzet et al., 2022; Liandrat et al., 2022). La couleur fait notamment partie des propriétés évaluées.

Cette section présente d'abord les procédés employés pour mesurer la couleur de chaque revêtement. Les résultats fournissent un premier aperçu des coordonnées colorimétriques par famille de chaussée. Ensuite, les résultats des différents processus sont utilisés pour définir un seuil de différence de couleur. Enfin, l'impact du vieillissement naturel sur la couleur de la chaussée est étudié en comparant les mesures d'origine avec celles effectuées après 30 mois.

5.1.1.1 Méthodologie

Pour évaluer la colorimétrie des échantillons, plusieurs sessions de mesure ont été réalisées avec trois appareils de mesure de la couleur de la marque Konica-Minolta : deux chromamètres du même modèle (CR-410, Figure 5.1 à gauche) et un spectrophotomètre (CM-2300d, Figure 5.1 à droite). De cette manière, il sera possible de vérifier que les mesures de couleur ne diffèrent pas d'un instrument à l'autre et nous pourrons définir un seuil de différence de couleur valable pour ces trois procédés.



FIGURE 5.1 – À gauche : Chromamètre CR-410 (Konica-Minolta). À droite : Spectrophotomètre CM-2300d (Konica-Minolta).

Les trois instruments éclairent l'échantillon avec un illuminant D65 et disposent d'une sphère d'intégration qui permet une diffusion homogène de la lumière réfléchi. Ils se distinguent par la taille de leur zone de mesure : le chromamètre a une ouverture de 50 mm tandis que le spectrophotomètre a une ouverture de 8 mm. Comme une chaussée est composée de granulats dont la taille est généralement comprise entre 2 et 14 mm, la zone de mesure du chromamètre n'est pas suffisante pour caractériser une chaussée dans son ensemble. Pour être plus représentative, pour chacun des processus utilisés,

l'expérience a consisté à mesurer les caractéristiques trichromatiques L^* , a^* et b^* dans le référentiel CIELAB sur un revêtement routier à plusieurs endroits proches.

Pour un échantillon, 20 mesures sont effectuées en différents points avec les chromamètres comme le montre la Figure 5.2 à gauche, tandis que 56 mesures sont nécessaires avec le spectrophotomètre (en raison de sa petite ouverture) (cf. Figure 5.2, à droite). La localisation des points de mesure peut varier en fonction de la forme de l'échantillon (disque ou rectangulaire). Ces points de mesure sont ensuite moyennés pour chacune des coordonnées L^* , a^* et b^* et attribués à l'échantillon.

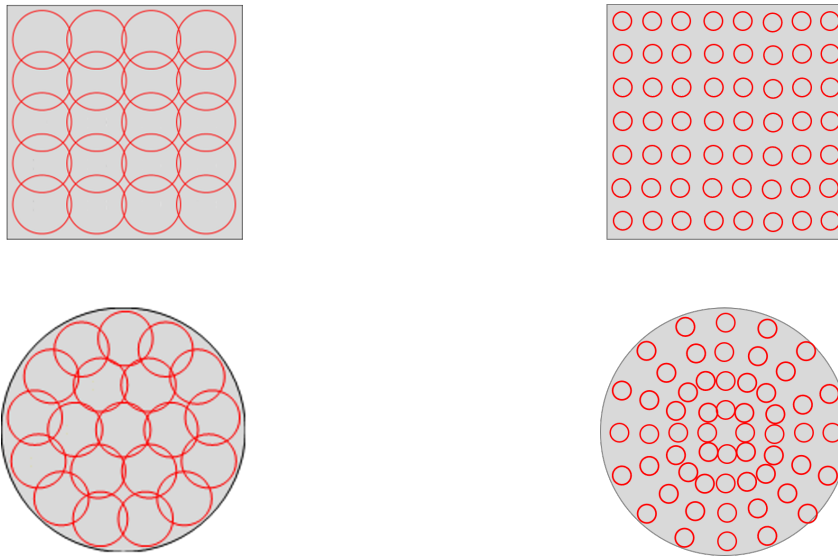


FIGURE 5.2 – Répartition des zones de mesure avec les chromamètres à gauche, et avec le spectrophotomètre à droite.

5.1.1.2 Panel de revêtements

La première étape a consisté à établir un panel représentatif de matériaux de revêtement urbains et interurbains incluant des technologies françaises innovantes. Ce panel comprend 30 revêtements différents :

- 7 bétons bitumineux (avec liant bitumineux ou synthétique),
- 6 asphaltes (avec liant bitumineux ou synthétique),
- 10 bétons de ciment coulés,
- 7 pavés préfabriqués en béton de ciment.

Pour chaque type de chaussée, plusieurs paramètres ont été différenciés afin de représenter les chaussées conventionnelles et innovantes utilisées dans les villes. En particulier, les paramètres suivants étaient variables, en fonction des matériaux :

- Formulation : nature et pourcentage du liant, granulométrie des agrégats, porosité ;
- Matériau coulé ou préfabriqué ;
- Couleur des granulats : foncée, claire en fonction de la couleur des cailloux utilisés ;
- Traitement de surface : pavés bruts, sablés, balayés, etc.

5.1.1.3 Résultats et discussion

Tous les revêtements ont été mesurés à leur état initial (T0) puis installés à l'extérieur afin de subir un vieillissement naturel pendant 30 mois (T30). Ce vieillissement implique l'exposition au soleil, à la pluie et à toute autre condition météorologique, mais aucune influence mécanique telle que le trafic, l'usure ou la salissure. Le vieillissement appliqué correspond à ce qui pourrait être observé à la fois sur les voies centrales des routes et sur les trottoirs urbains non utilisés par les voitures, tels que les pistes cyclables, les bas-côtés ou les places. Les résultats de mesure de chaque échantillon à T0 et à T30 sont donnés en Annexe A.4.

Les mesures montrent qu'il est possible d'obtenir une large gamme de couleurs au sein d'une même famille de chaussée. Cela est possible grâce à l'utilisation de granulats de différentes couleurs, de différents types de liants, de pigments et de traitements de surface. La Figure 5.3 montre quatre bétons bitumineux et quatre pavés préfabriqués en béton de ciment de couleurs différentes.

Définition du seuil de différence de couleur

Pour étudier l'effet du vieillissement naturel sur la couleur, il est nécessaire d'établir un seuil à partir duquel la différence de couleur est considérée comme significative visuellement. Comme il n'existe pas de seuil de référence pour les chaussées, nous avons décidé de le construire sur la base des résultats obtenus par les trois processus de mesure, selon le principe d'essais d'inter-comparaison entre laboratoires. Ainsi, la variabilité globale est établie à partir des variabilités individuelles obtenues par les trois procédés. Nous rappelons ici que chaque résultat d'un processus pour un échantillon est lui-même issu de

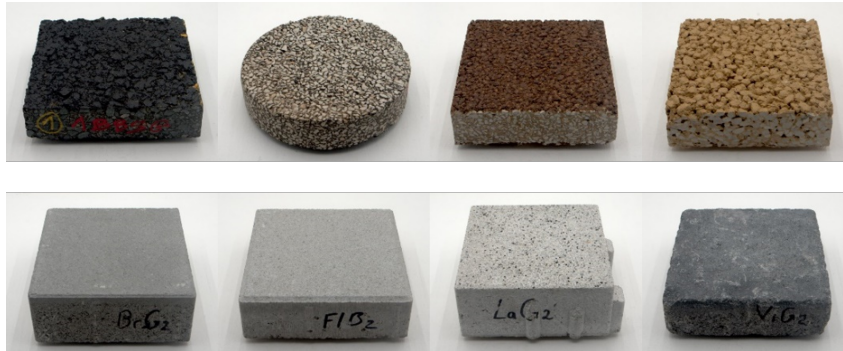


FIGURE 5.3 – Illustration de la diversité de couleurs possible des chaussées. Sur la première ligne, quatre exemples de bétons bitumineux. En dessous, quatre exemples de pavés préfabriqués en béton de ciment.

plusieurs mesures sur l'échantillon. Cela permet de tenir compte du fait que l'on travaille avec des instruments différents, de nature différente et que les mesures sont effectuées par des personnes différentes.

Tout d'abord, nous calculons les coordonnées moyennes de chaque revêtement à partir des mesures obtenues avec ces trois appareils (exemple pour L^* dans l'Équation 5.1) (cf. dernière colonne des tableaux de mesure donnés en Annexe A.4). Ensuite, nous déterminons la différence de couleur entre les coordonnées obtenues à partir de chacun des processus et les coordonnées moyennes (exemple pour le processus avec le CM-2300d dans l'Équation 5.2). Enfin, toutes les différences de couleur calculées sont regroupées et triées par ordre croissant et le seuil est fixé de manière à ce que 95 % des ΔE_{ab}^* lui soient inférieurs. Le seuil de différence de couleur obtenu est de 4,4 (cf. Figure 5.4). Nous noterons sa cohérence avec les seuils présentés dans le Tableau 2.1. En dessous de ce seuil, nous nous trouvons dans la zone d'incertitude de la méthode d'inter-comparaison et nous ne pouvons donc pas conclure à la significativité de la différence de couleur.

$$L_{moy}^* = \frac{L_{moyCR1}^* + L_{moyCR2}^* + L_{moyCM}^*}{3} \quad (5.1)$$

$$\Delta E_{abCM}^* = \sqrt{(L_{moyCM}^* - L_{moy}^*)^2 + (a_{moyCM}^* - a_{moy}^*)^2 + (b_{moyCM}^* - b_{moy}^*)^2} \quad (5.2)$$

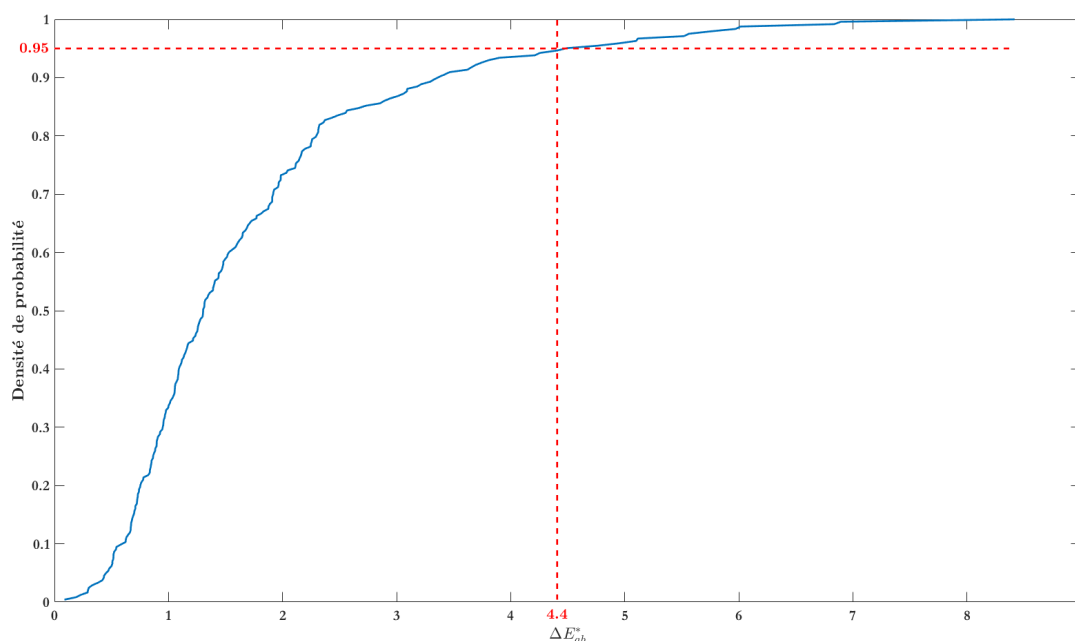


FIGURE 5.4 – Densité de probabilité des différences de couleur calculées.

Effet du vieillissement naturel

Pour travailler avec des revêtements à T0 et T30 mesurés dans les mêmes conditions, deux échantillons de chaque revêtement ont été réalisés et l'un d'entre eux a été placé au réfrigérateur pendant les 30 mois afin de stopper son vieillissement tandis que l'autre a été placé à l'extérieur. Des mesures ont été effectuées à T0 et T30 sur les échantillons laissés au réfrigérateur. Il a été vérifié que la différence de couleur est inférieure à 4,4, c'est pourquoi les échantillons réfrigérés sont considérés comme des échantillons T0 dans la suite.

Les graphiques de la Figure 5.5 présentent l'évolution des coordonnées colorimétriques de chaque échantillon au cours du vieillissement par type de revêtement. La figure de gauche montre l'évolution de la luminosité L^* et la figure de droite montre l'évolution de la chrominance dans le plan (a^*, b^*) . La mesure à l'état initial T0 est la valeur à l'origine de la flèche et la mesure T30 correspond à la pointe de la flèche.

Sur la Figure 5.5 à droite, on peut voir que, quelle sur soit la famille de revêtement, toutes les flèches semblent pointer vers la même zone, correspondant à un revêtement gris. L'évolution dans le plan (a^*, b^*) est vraiment importante pour les revêtements à liant

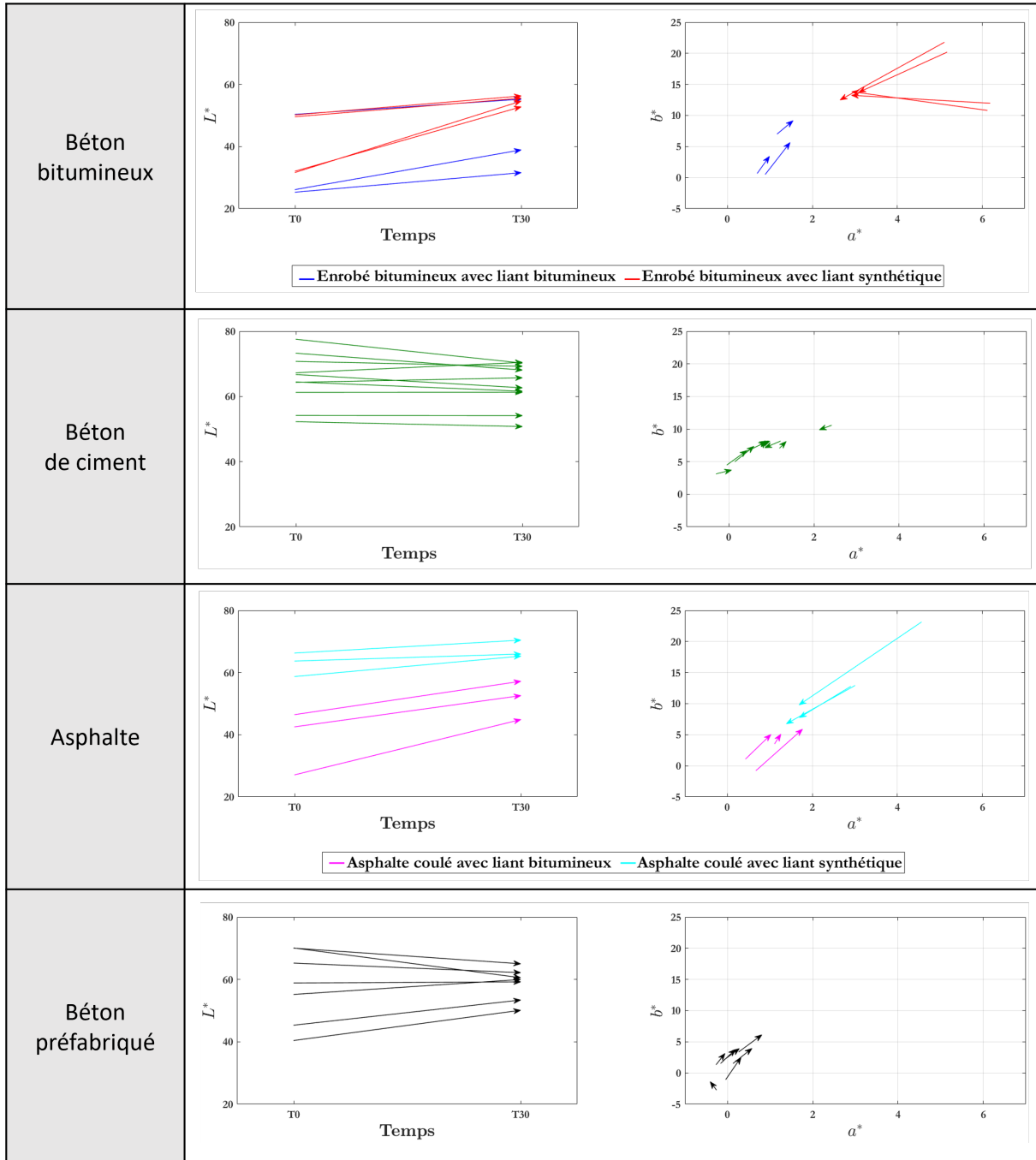


FIGURE 5.5 – Représentation des coordonnées colorimétriques par famille de revêtements.

synthétique (béton et asphalte) qui étaient initialement plus colorés, alors qu'elle reste plus modérée pour ceux à liant bitumineux, tout comme pour les échantillons en béton de ciment (coulés et préfabriqués). On constate également sur la Figure 5.5 à gauche que les chaussées bitumineuses (béton et asphalte) ont généralement tendance à s'éclaircir alors que les échantillons de béton de ciment (coulé et préfabriqué) s'assombrissent.

Pour voir si l'évolution dans le temps des coordonnées colorimétriques est significative d'un changement de couleur, nous regardons pour chaque revêtement si la différence de couleur entre T0 et T30 est supérieure à 4,4, le seuil défini précédemment. Pour chaque type de revêtement, le Tableau 5.1 présente, sur un graphe, les différences de couleur calculées entre T0 et T30, avec le seuil de 4,4 tracé en rouge permettant ainsi une identification visuelle des différences de couleur considérées comme perceptibles. Aussi, pour chaque famille de chaussée, on a fait figurer des photos des échantillons T0 et T30 qui amènent aux différences de couleurs minimale et maximale pour mieux se rendre compte des aspects de surface. Les différences de couleur calculées entre T0 et T30 pour chaque revêtement sont données en Annexe A.4 et on a mis en évidence, pour chaque famille de revêtement, la différence de couleur minimale en vert et la différence de couleur maximale en rouge.

Tout d'abord, on remarque que la couleur des échantillons de béton bitumineux et d'asphalte change quelle que soit la formulation. Par contre, la différence de couleur des échantillons de béton de ciment entre T0 et T30 n'est pas souvent perceptible, surtout pour les bétons coulés. On observe également que les échantillons bruts avec liant bitumineux évoluent plus que les échantillons traités en surface (cf. description des échantillons en Annexe A.4). Par exemple, les échantillons de béton bitumineux n°2 et 3 sont identiques mais le n°3 est sablé. La différence de couleur varie du simple au triple. De plus, le Tableau 5.1 montre que la couleur des revêtements à granulats foncés tend à moins évoluer que celle des revêtements à granulats clairs, quelle que soit la famille de chaussée. Enfin, nous retrouvons un résultat précédent : les chaussées à liant synthétique semblent évoluer davantage que les chaussées bitumineuses. Par exemple, les échantillons de béton bitumineux n°2 et 4 sont identiques mais le n°4 est réalisé avec un liant synthétique. Cependant, on peut noter que l'utilisation de TiO_2 pour les revêtements synthétiques bitumineux, utilisé pour blanchir et stabiliser la couleur (Ployaert & Van Audenhove, 2010; Pierard et al., 2013), semble réduire l'évolution de la couleur.

Béton bitumineux			Béton de ciment		
Représentation du ΔE_{ab}^* 	$\Delta E_{ab}^*_{min}$		$\Delta E_{ab}^*_{min}$		$\Delta E_{ab}^*_{max}$
	T0	T30	T0	T30	
Béton bitumineux sablé $\Delta E_{ab}^* = 5,4$	Béton bitumineux synthétique brut $\Delta E_{ab}^* = 23,4$		Béton de ciment désactivé $\Delta E_{ab}^* = 1,1$		Béton de ciment bouchardé $\Delta E_{ab}^* = 7,3$
Asphalte			Béton préfabriqué		
Représentation du ΔE_{ab}^* 	$\Delta E_{ab}^*_{min}$		$\Delta E_{ab}^*_{min}$		$\Delta E_{ab}^*_{max}$
	T0	T30	T0	T30	
Asphalte synthétique poncé avec TiO_2 $\Delta E_{ab}^* = 6,8$	Asphalte brut $\Delta E_{ab}^* = 19,0$		Béton préfabriqué grenailé $\Delta E_{ab}^* = 2,3$		Béton préfabriqué flammé $\Delta E_{ab}^* = 9,9$

TABLEAU 5.1 – Différences de couleur des revêtements entre leur état initial (T0) et après 30 mois de vieillissement naturel en extérieur (T30).

Pour résumer, l'évolution de la couleur dans le temps est très différente selon le type de revêtement. Généralement, les revêtements bitumineux (béton et mastic) ont tendance à évoluer davantage que les échantillons en béton de ciment (coulés et préfabriqués). La couleur d'une chaussée sans traitement de surface change plus que celle d'une chaussée traitée, de même que lorsque des granulats clairs sont utilisés plutôt que des foncés. Il en va de même lorsque le liant est synthétique, mais il semble que l'utilisation de TiO_2 dans les revêtements bitumineux synthétiques réduise l'évolution de la couleur.

Cette étude nous a permis de montrer que les chaussées urbaines actuelles peuvent couvrir une large gamme de caractéristiques colorimétriques. Cela est possible grâce à l'utilisation de granulats de différentes couleurs, de différents types de liants, de pigments et de traitements de surface. Ainsi, cette diversité peut améliorer la lisibilité de l'espace urbain en matérialisant au sol des contrastes colorés afin d'identifier des espaces dédiés aux différents usages.

5.1.2 Lien possible entre L^* et albédo

Par ailleurs, nous nous sommes également intéressés à l'albédo des revêtements puisque ces derniers jouent aussi un rôle de jour, par exemple dans la limitation des effets d'îlots de chaleur urbain. En effet, l'albédo est le pouvoir réfléchissant d'une surface, c'est-à-dire le rapport du flux d'énergie réfléchi et du flux d'énergie incident. Il est sans dimension et varie entre 0 et 1, 0 correspondant à une surface qui absorbe tout le rayonnement solaire, et 1 à une surface renvoyant tous les rayons. Plus le rayonnement absorbé par la surface est important et moins il est réfléchi, plus la surface chauffe. Les revêtements noirs ont une valeur d'albédo faible et absorbent donc une grosse partie des rayons du soleil et se réchauffent fortement, ce qui contribue aux effets d'îlots de chaleur urbain. Les revêtements blancs ont un albédo élevé et réfléchissent beaucoup plus le rayonnement, de sorte qu'ils se réchauffent moins rapidement. C'est notamment pour cette raison, et donc pour lutter contre les effets d'îlots de chaleur urbain, que la ville de Los Angeles a choisi, en 2017, de peindre plusieurs de ses rues avec un revêtement spécial blanc grisé (Le Point, 2017), permettant jusqu'à 6°C de moins à la surface de la chaussée.

Lafon (2020) a montré une corrélation entre la coordonnée L^* et l'albédo des enrobés, et selon lui, il serait possible d'estimer une température ressentie à partir d'une simple mesure de L^* . La mesure de l'albédo des revêtements n'étant que très rarement réalisée et

quelque peu contraignante, il nous a semblé intéressant de regarder si une simple mesure de couleur, et notamment du L^* , peut nous renseigner sur l'albédo du revêtement. Nous avons donc décidé de voir s'il était possible de retrouver cette corrélation pour tous les types de revêtements présents dans notre panel, et pas seulement les enrobés.

L'appareil qui mesure l'albédo est un albedomètre et il est généralement composé de deux pyranomètres (cf. Figure 5.6). L'un est orienté vers le haut et mesure le rayonnement solaire incident (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). L'autre est orienté vers le bas et mesure le rayonnement solaire réfléchi par la surface. L'albedomètre est sensible dans un domaine spectral de 300 à 2 500 nanomètres selon le filtre utilisé.



FIGURE 5.6 – Exemple d'albedomètre de la marque BLET (Source : <https://www.blet-climat.fr/bilan-radiatif/albedometre-cma-6.html>)

Ne disposant pas d'albedomètre, nous avons effectué des mesures de ce que nous appellerons par la suite un pseudo-albédo sur 20 échantillons du panel de revêtement évoqué dans la Section 5.1.1. La mesure a consisté à éclairer l'échantillon à l'aide d'une source halogène à spectre continu puis à évaluer la quantité du rayonnement réfléchi par celui-ci avec un spectroradiomètre (cf. Figure 5.7). La même procédure a été effectuée avec un spectralon de référence pour connaître l'énergie reçue. Le pseudo-albédo est alors évalué en intégrant pour chaque longueur d'onde la réflexion due au revêtement sur l'ensemble du spectre de la source, pondérée par un facteur de correction du spectre pour se rapporter au soleil.

Le pseudo-albédo de chaque revêtement est tracé sur la Figure 5.8 en fonction de la valeur du L^* mesurée en Section 5.1.1. Une courbe de régression linéaire de la forme $ax + b$ est obtenue avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,88274$.

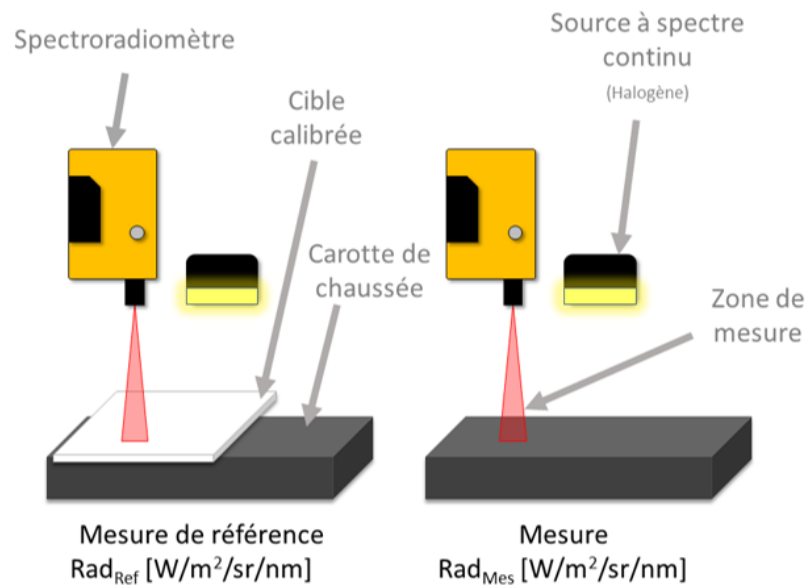
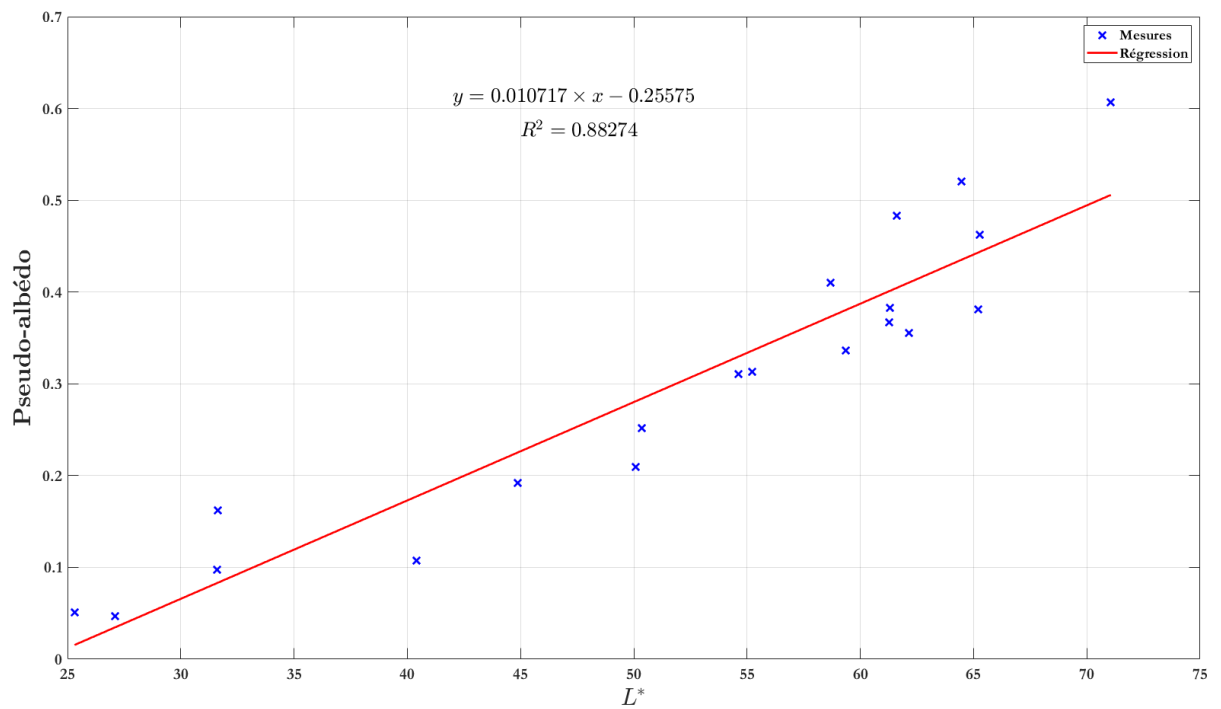


FIGURE 5.7 – Schéma de mesure d'un pseudo-albédo de revêtement de chaussée.

FIGURE 5.8 – Pseudo-albédo de revêtements routiers en fonction de la valeur de L^* mesuré dans le référentiel CIELAB.

Cette étude préliminaire semble montrer un lien entre L^* et ce pseudo-albédo. L'étape suivante consistera donc à adapter la méthode de mesure pour obtenir un albédo réel. De cette manière, nous verrons si ce lien entre L^* et l'albédo du revêtement existe réellement. Dans ce cas, une approximation de l'albédo pourra être faite à partir des coordonnées colorimétriques et utilisée ensuite dans des calculs thermiques à la place des valeurs standardisées. De plus, en connaissant l'effet du vieillissement naturel sur la couleur, il sera possible d'évaluer l'effet du vieillissement naturel sur l'albédo d'une chaussée.

5.2 Simulation dans Unity 3D

Comme nous le disions en introduction, nous aimerions disposer d'un environnement numérique dans lequel on peut évaluer directement les performances des installations d'éclairage selon le revêtement en place et le type d'utilisateur. Dans l'objectif de valider notre proposition de déclassement pour le dimensionnement d'éclairage urbain, nous avons donc mené une étude exploratoire avec le moteur de jeu Unity 3D.

5.2.1 Simulation de l'éclairage

Nous nous intéressons tout d'abord à la reproduction de la propagation lumineuse. Pour cela, nous simulons une scène simple avec le *pipeline* de rendu HDRP (High Definition Render Pipeline) de Unity 3D car les techniques d'éclairage sont dites basées sur la physique. La scène, visible sur la Figure 5.9, est composée des éléments suivants :

- une source de lumière ponctuelle située à 8 m du sol, avec une température de couleur de 4000 K et un flux lumineux de 6700 lm (paramètres cohérents pour un luminaire d'éclairage routier) ;
- une surface plane de 76 m × 76 m dotée d'une texture totalement diffuse afin qu'elle n'intervienne pas dans la quantité de lumière perçue ;
- une caméra⁵ orthographique placée au-dessus de la surface à observer dont la zone de capture correspond à la taille de la surface ;
- un volume qui va permettre certains réglages pour que l'image obtenue par la caméra ne sature pas ;

5. Unity 3D ne dispose d'aucun autre moyen de mesure que la caméra.

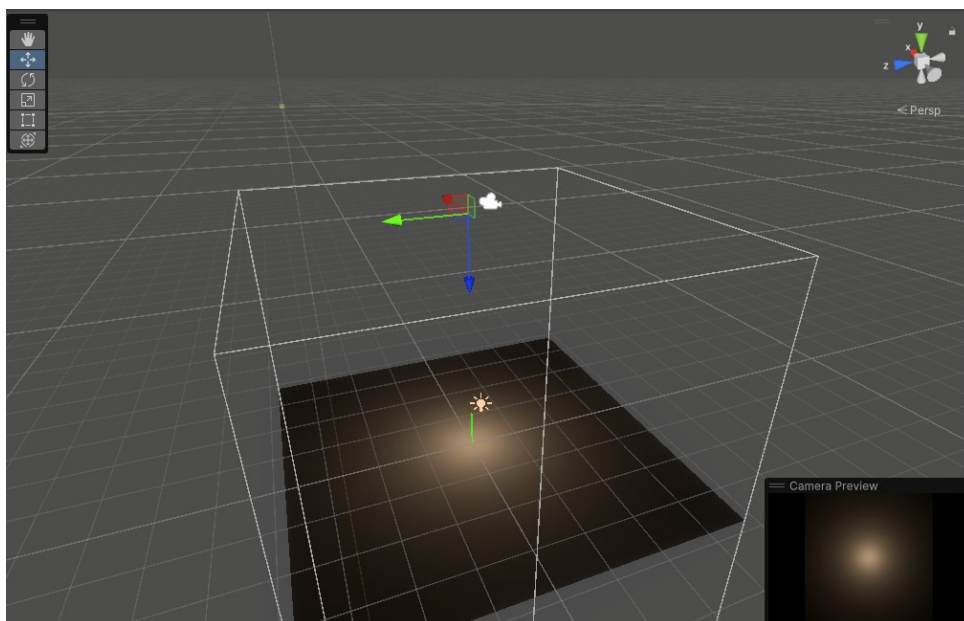


FIGURE 5.9 – Capture d’écran de la scène simulée pour évaluer le comportement de la lumière sous Unity 3D.

La caméra nous permet d’obtenir une image RGB de 256×256 pixels que nous transformons ensuite en niveaux de gris avec la Formule 5.3. Comme aucun tableau de distribution d’intensité lumineuse⁶ n’est fourni, la source de lumière est censée envoyer la même intensité dans toutes les directions. On compare les niveaux de gris obtenus avec les valeurs d’éclairement théorique calculées sur Matlab. Pour une meilleure comparaison de la distribution de l’éclairement obtenu sur la surface, on convertit les valeurs de niveaux de gris en éclairement via une normalisation puis une multiplication par le maximum d’éclairement théorique. On peut voir sur la Figure 5.10 que les deux distributions sont très similaires mais pas égales. Unity 3D semble étaler l’éclairement, le lisser. Néanmoins, le rendu obtenu par Unity 3D reste satisfaisant.

$$NG = 0,299 \times R + 0,587 \times G + 0,114 \times B \quad (5.3)$$

Nous avons donc entrepris de faire un ajustage pour relier les niveaux de gris à des niveaux d’éclairement. Pour cela, nous avons fait varier le flux de 1000 à 9000 lumens puis nous avons relevé le niveau de gris correspondant à l’éclairement maximal théorique. On

6. Aussi appelé fichier IES

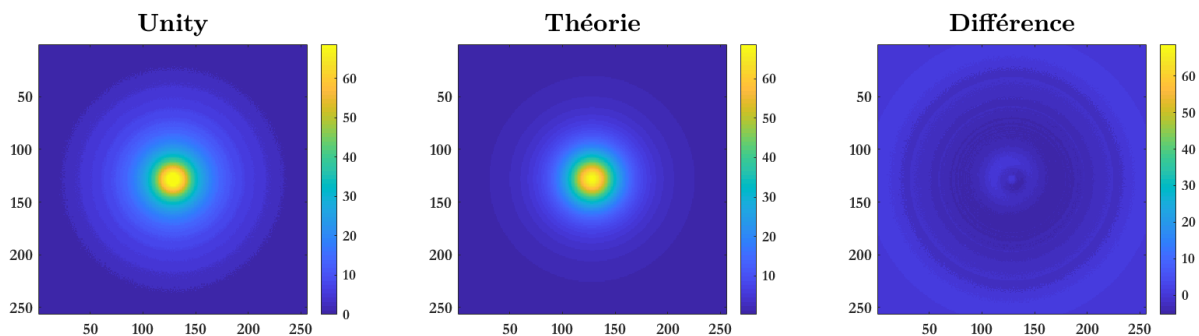


FIGURE 5.10 – Distributions de l’éclairage généré par une source ponctuelle sous Unity 3D, par la théorie, et la différence entre les deux.

trace ensuite, sur la Figure 5.11, l’éclairage en fonction du niveau de gris obtenu sous Unity 3D (croix rouges sur la figure) ainsi que la régression trouvée de la forme de l’équation 5.4 (courbe bleue). Cela pourrait nous permettre ensuite d’obtenir la distribution de l’éclairage sur la surface pour n’importe quelle autre source de lumière.

$$E = \exp(a \times NG^b + c) \tag{5.4}$$

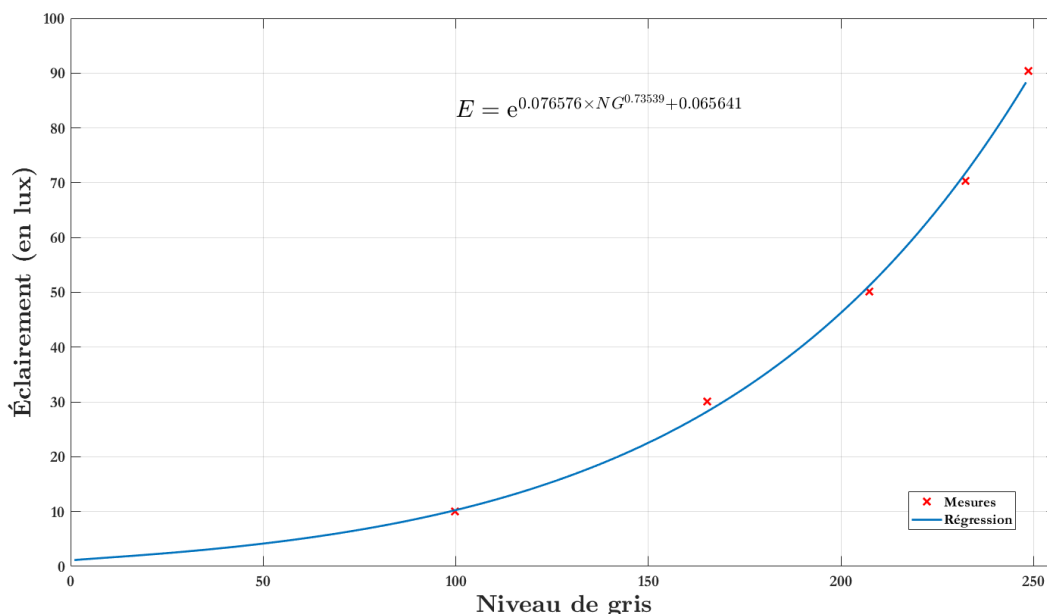


FIGURE 5.11 – Éclairage en fonction du niveaux de gris sous Unity 3D pour un ensemble de paramètres donné.

Néanmoins, on a remarqué que si on fait varier le paramètre EV du volume, l'image enregistrée n'est plus la même (cf. Figure 5.12). Ce paramètre semble correspondre à ce qu'on appelle l'« indice de lamination⁷ » et joue donc sur les réglages de la caméra virtuelle. Par conséquent, il est nécessaire de trouver un EV qui permet de ne pas obtenir de pixels saturés sur l'image enregistrée par la caméra virtuelle quel que soit le flux du luminaire. Dans notre cas de la source ponctuelle, on garde l' EV à 0,8 comme pour l'ajustage puisqu'il permet de ne pas avoir de saturation.

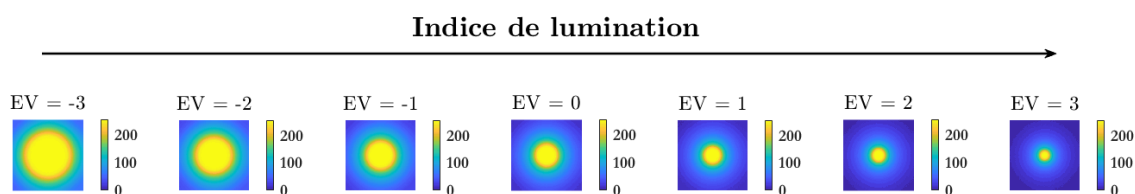


FIGURE 5.12 – Distributions de l'éclairage généré par une source ponctuelle sous Unity 3D en modifiant seulement le paramètre EV .

On décide ensuite de changer la photométrie du luminaire et on spécifie alors un fichier IES. Le luminaire choisi est le luminaire Oxane, produit de Thorn Lighting. Un schéma de la distribution de l'éclairage, fourni par le fabricant, est visible sur la Figure 5.13.

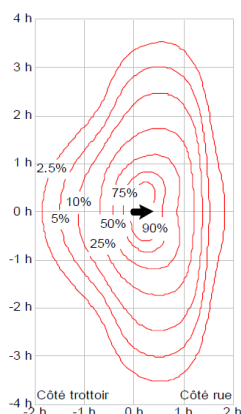


FIGURE 5.13 – Distribution de l'éclairage généré par le luminaire Oxane selon la fiche technique fournie par le fabricant.

7. L'indice de lamination dépend du temps de pose, de l'ouverture de la caméra et de sa sensibilité ISO.

La distribution de l'éclairage généré sur la surface dans Unity 3D semble similaire à celle fournie par le fabricant (cf. Figure 5.14). Cependant, la forme de « haricot » au centre semble bien plus étalée que ce qu'elle devrait être, comme nous avons déjà pu l'apercevoir sur la Figure 5.10.

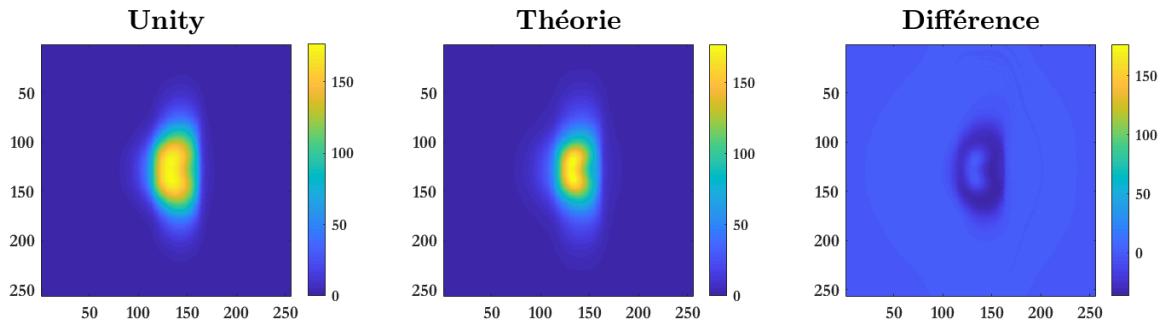


FIGURE 5.14 – Distributions de l'éclairage généré par le luminaire Oxane sous Unity 3D, par la théorie, et la différence entre les deux.

Par ailleurs, on a remarqué que les coefficients spécifiés dans le fichier IES ne semblaient avoir aucune influence sur la valeur de l'éclairage mesuré mais seulement sur la distribution. Pour le vérifier, nous avons créé deux fichiers IES de telle sorte que la même intensité de lumière soit envoyée dans toutes les directions. Pour l'un des fichiers, on a choisi arbitrairement de mettre tous les coefficients à 0,30 et pour l'autre, ils sont tous égaux à 640. Pour un même flux, on devrait alors observer la même distribution d'éclairage mais des valeurs plus de 2000 fois supérieures avec le second fichier IES. Or, ce n'est pas ce qu'on observe comme le montre la Figure 5.15. Les deux scènes générées montrent exactement le même éclairage sur la surface. Il semblerait que lorsque Unity 3D récupère le fichier IES, il normalise les coefficients pour les appliquer ensuite. Il serait donc nécessaire d'écrire un script qui, au lancement de la scène Unity 3D et pour chaque luminaire possédant un fichier IES, multiplie le flux par un facteur égal au coefficient maximal du fichier IES divisé par 10^3 (car par convention les valeurs des coefficients sont donnés pour des kilolumens). Cela réglerait le problème de l'obtention d'un même éclairage pour des coefficients IES différents mais ne résoudrait pas la distribution incorrecte de l'éclairage obtenue sur la surface que l'on a pu observer sur les Figures 5.10 et 5.14.

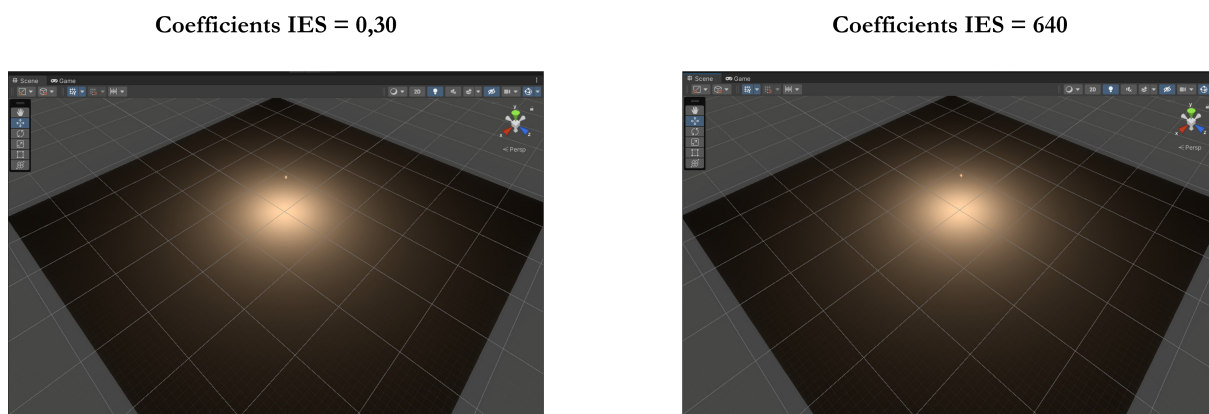


FIGURE 5.15 – Captures d’écran des scènes Unity 3D générées lorsqu’on applique au luminaire un fichier IES contenant des coefficients qui sont tous égaux à 0,30 pour l’image de gauche et égaux à 640 pour l’image de droite.

5.2.2 Simulation des propriétés optiques du revêtement

Nous nous sommes également intéressés au comportement optique des matériaux dans Unity 3D. Lorsque nous observons les paramètres de la surface de notre scène, une dizaine sont modifiables mais aucun ne permet de renseigner une table- r ou une BRDF. Nous nous intéressons donc à deux options, *Metalness* et *Roughness*, car elles semblent être les seules à avoir une influence sur les propriétés optiques du matériau selon les descriptions suivantes, données dans la documentation de Unity 3D.

- ***Metalness*** : « Use this slider to adjust how "metal-like" the surface of your Material is (between 0 and 1). When a surface is more metallic, it reflects the environment more and its albedo color becomes less visible. At full metallic level, the surface color is entirely driven by reflections from the environment. When a surface is less metallic, its albedo color is clearer and any surface reflections are visible on top of the surface color, rather than obscuring it. »
- ***Roughness*** : « Use the slider to adjust the smoothness of your Material. Every light ray that hits a smooth surface bounces off at predictable and consistent angles. For a perfectly smooth surface that reflects light like a mirror, set this to a value of 1. Less smooth surfaces reflect light over a wider range of angles (because the light hits the bumps in the microsurface), so the reflections have less detail and spread across the surface in a more diffused pattern. »

Afin de comprendre l'influence de ces paramètres sur les propriétés photométriques d'un revêtement, nous avons décidé de reproduire un gonioréfectomètre sous Unity 3D. Pour cela, nous créons une nouvelle scène dans laquelle on ajoute une surface puis on dispose la caméra de telle sorte qu'elle regarde le centre de la surface avec un angle de 1° sous l'horizontale (cf. Figure 5.16). On ajoute une lumière unidirectionnelle afin d'éclairer la surface et on fixe la quantité de lumière émise avec une valeur en éclairement de 500 lux⁸. Aussi, on lui affecte un script afin qu'elle se place de façon automatique selon les angles correspondant aux valeurs de β et γ de la table- r . De plus, on dispose un volume afin de régler EV de telle sorte qu'il n'y ait pas de saturation. Enfin, un script est attribué à la surface pour faire varier les valeurs de *Metalness* et *Roughness* entre 0 et 1 par pas de 0,1.

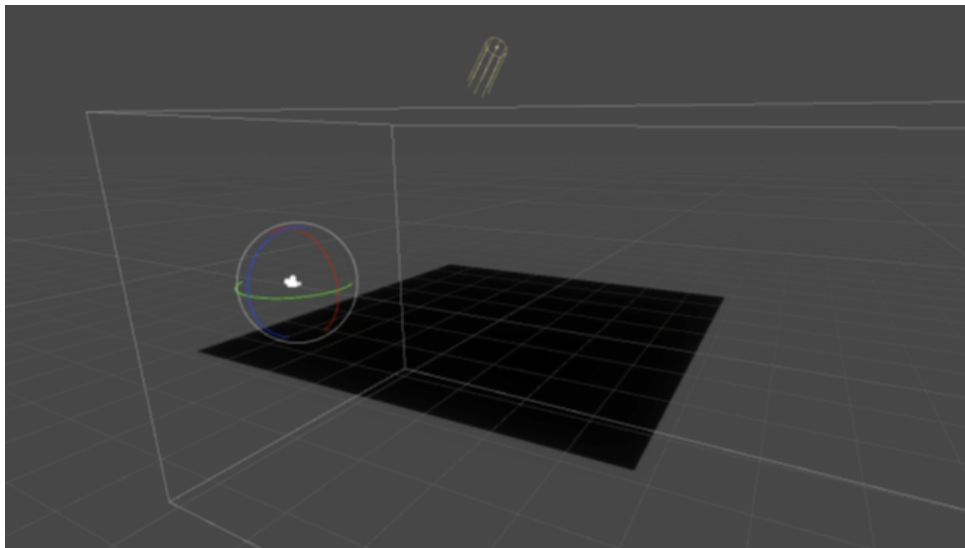


FIGURE 5.16 – Scène Unity 3D reproduisant un gonioréfectomètre.

Les coefficients de réflexions déduits de ces mesures sont tracés sur la Figure 5.17 sous la forme de solides photométriques. Nous n'avons pas étalonné la caméra pour toutes les valeurs d' EV utiles et nous nous sommes donc contentés pour le moment d'observer la forme des solides photométriques obtenus.

On observe que les paramètres *Metalness* et *Roughness* agissent sur le comportement optique du matériau comme le laissait penser leurs descriptions. Ils semblent influencer

8. Unity 3D propose différentes unités pour régler la quantité de lumière émise par une source dont les lux, les lumens et les candelas par mètre carré.

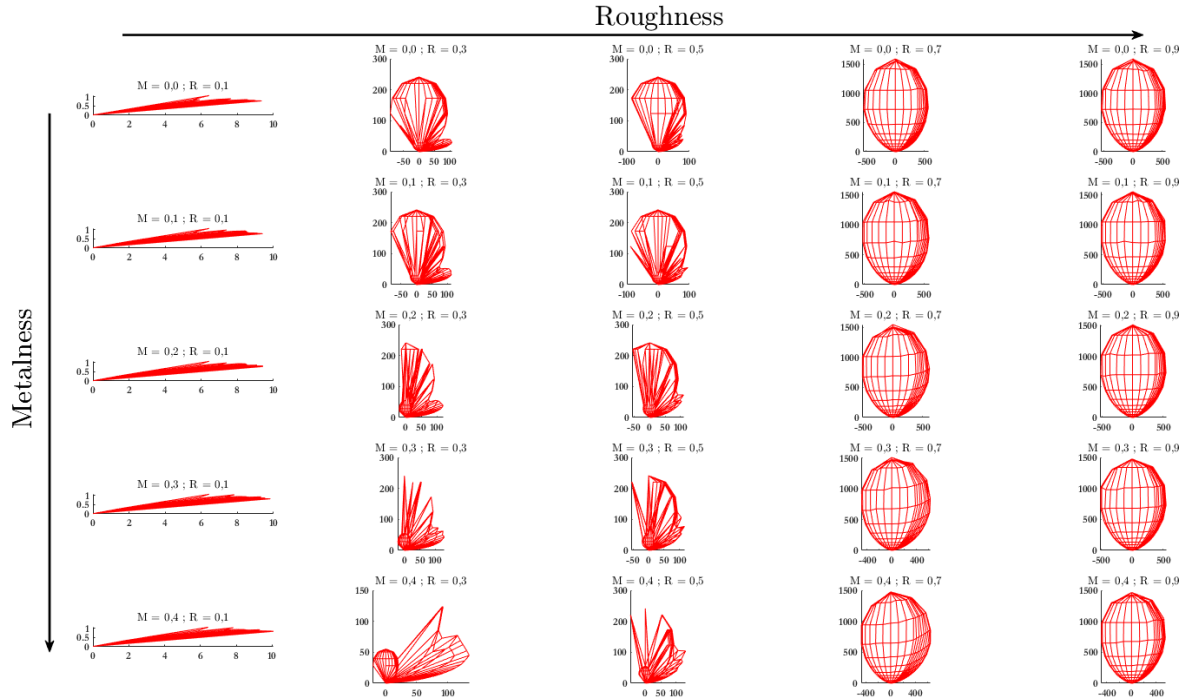


FIGURE 5.17 – Solides photométriques représentant une partie des tables- r obtenues avec Unity 3D en faisant varier les valeurs des paramètres *Metalness* et *Roughness* (respectivement M et R) du revêtement.

les caractères diffus et spéculaire du revêtement. On voit que le paramètre *Roughness* semble prendre le dessus sur le paramètre *Metalness*. En effet, de gauche à droite sur la Figure 5.17, on va du revêtement le plus spéculaire au plus diffusant, avec d'autant moins d'influence du paramètre *Metalness* lorsque le paramètre *Roughness* augmente.

Le paramètre *Roughness* a l'air d'agir sur le caractère spéculaire du revêtement. De façon plus subtile, le paramètre *Metalness* semble influencer sur le caractère diffus du revêtement lorsqu'on observe la deuxième colonne de la Figure 5.17. Cependant, ces paramètres restent très abstraits quant à leur impact sur les propriétés optiques du matériau.

Pour résumer, nous avons pu voir que le traitement de la lumière dans Unity 3D reste opaque et lisse la distribution de l'éclairement au sol pour un meilleur rendu visuel. Aussi, le moteur de jeu ne donne pas la possibilité de spécifier directement les propriétés de réflexion des revêtements sous la forme de BRDF ou de tables- r . Il faut jouer avec les paramètres du matériau, notamment *Metalness* et *Roughness*, pour approximer le

caractère réfléchissant de celui-ci. Sans savoir comment sont traitées la lumière et les propriétés optiques des matériaux, Unity 3D reste une « boîte noire » et il est pour l’instant quasi-impossible d’en ressortir une image en luminance pour faire de la mesure grâce à ce moteur de jeu.

Toutefois, comme nous avons pu l’observer dans la Section 5.2.1, le rendu visuel dans Unity 3D est satisfaisant et peut permettre de visualiser une scène de façon réaliste. Unity 3D pourrait donc devenir un outil d’aide à la décision, pour les communes par exemple. En effet, la simulation de scène virtuelle permettrait notamment de mieux s’imaginer un aménagement urbain après travaux et apporterait donc des réponses aux questionnements de l’ordre de l’esthétisme, d’une place publique par exemple.

De plus, pour rendre une scène virtuelle dans Unity 3D encore plus réaliste, il serait intéressant d’étudier la possibilité de forcer l’éclairement sur le sol et/ou la luminance observée par la caméra pour les faire correspondre à la réalité. Pour cela, on pourrait effectuer les calculs d’éclairage dans notre logiciel ESPRIE puis générer des *cookies* qui agiraient comme des filtres pour un rendu visuel correspondant totalement avec la réalité. Si cela est possible, ou encore mieux, si les développeurs de Unity 3D le font évoluer de telle sorte qu’il y ait plus de physique dans le traitement de la lumière, alors Unity 3D nous offrirait la possibilité de faire des expérimentations avec sujets dans un environnement virtuel réaliste que l’on contrôle. On serait en capacité de régler les paramètres des luminaires et du revêtement pour obtenir les luminances souhaitées au sol et on pourrait alors évaluer facilement si le déclassement d’un rang pour les classes d’éclairage M a un impact sur le confort et la visibilité des usagers. Les scènes virtuelles réalistes pourraient également nous servir à valider des modèles concernant la détection d’obstacles par exemple. Enfin, on pourrait également tester la lisibilité des espaces en utilisant différentes couleurs de revêtements et évaluer son évolution dans le temps.

CONCLUSION

Aujourd'hui, l'adaptation des territoires au changement climatique est un sujet de plus en plus important et beaucoup de réflexions sont menées pour intégrer cet impératif à la ville. L'aménagement de l'espace public urbain s'inscrit donc dans une logique de développement durable où les enjeux économiques, environnementaux et sociétaux sont prégnants et interconnectés. Dans ce contexte, la réduction des dépenses énergétiques associées à l'éclairage public est un moyen d'action privilégié. Mais, avant même de songer à prendre des décisions radicales qui pourraient soulever des débats de société, comme une extinction totale de l'éclairage public par exemple, il paraît nécessaire d'améliorer nos pratiques.

La conception d'une installation d'éclairage routier nécessite une combinaison des propriétés photométriques de la surface de la route et des caractéristiques optiques des luminaires afin de garantir le confort visuel des usagers, tout en assurant la sécurité routière et une consommation d'énergie minimale. Cependant, les pratiques actuelles ne considèrent pas toujours correctement ces paramètres.

Pour les raisons évoquées dans l'état de l'art, la communauté scientifique du domaine de l'éclairage et de la photométrie des revêtements s'accorde sur deux nécessités :

- reconsidérer la géométrie standard à 1° en éclairage urbain et définir de nouveaux angles d'observation plus adaptés aux usages nocturnes de l'espace public et à ses différents types d'usagers,
- et mieux considérer les propriétés réelles de réflexion des revêtements.

L'objectif de cette thèse a donc été de développer une nouvelle méthodologie de dimensionnement et d'évaluation d'aménagement urbain nocturne sous éclairage public. Celle-ci se devait d'intégrer les propriétés réelles de réflexion des revêtements et la possibilité de faire varier l'angle d'observation afin d'offrir un environnement nocturne mieux adapté aux besoins réels des usagers.

La première partie des travaux s'est concentrée sur l'impact du revêtement en éclairage routier. Afin d'évaluer celui-ci, nous avons développé un logiciel de calcul d'éclairage permettant l'estimation des performances d'une installation selon les recommandations actuelles. On y a ensuite inclus la possibilité d'utiliser des tables- r réelles afin de mieux considérer les propriétés de réflexion des revêtements. Ainsi, on a pu noter que négliger ces caractéristiques pouvait conduire à un sur-éclairage et donc à de l'énergie dépensée inutilement, ou à un sous-éclairage pouvant causer des problèmes de sécurité.

Pour aller plus loin que les critères de qualité classiques, nous avons décidé d'ajouter à notre logiciel, un calcul de niveau de visibilité d'une cible en suivant le modèle d'Adrian. Après quoi, nous l'avons mis en œuvre sur différents couples revêtement/éclairage. Les résultats obtenus ont montré que les critères de performance actuels ne suffisent pas toujours à assurer la sécurité des usagers sur l'ensemble de la chaussée. Des zones d'invisibilité peuvent être trouvées localement pour certains couples sans pour autant que les critères de performance habituellement utilisés ne soient en-deçà des valeurs recommandées. Aussi, on a pu observer l'impact du revêtement en place. En effet, malgré des performances classiques similaires, deux couples revêtement/éclairage peuvent ne pas offrir la même répartition des niveaux de visibilité d'une cible. En général, les revêtements clairs ont tendance à améliorer la visibilité car la cible présente un contraste négatif avec la route, c'est-à-dire que sa luminance est inférieure à celle de la route.

Tous ces résultats montrent qu'il serait nécessaire de réintégrer le critère de visibilité dans le dimensionnement d'éclairage, au moins en simulation car, si les résultats ne sont pas bons en simulation, ils peuvent être encore pires dans la réalité. C'est ce que nous avons pu observer en croisant nos simulations avec des mesures *in situ*. Quelques nuances sont tout de même apportées à ce propos car nous savons que les choix faits pour la mise en œuvre du modèle d'Adrian peuvent avoir une influence sur la visibilité. Par exemple, le choix de la réflectance de la cible peut être critiquée. En effet, on a décidé de considérer une cible avec une réflectance de 20 % comme le recommandaient les standards européens lorsque le VL était encore prescrit (CIE, 1995). Cependant, on aurait tout aussi bien pu utiliser une réflectance de 50 % comme dans le modèle STV qui était utilisé dans les normes américaines (ANSI/IESNA, 2000). Aussi, le calcul de l'éclairement réfléchi sur la cible dépend de la taille de la zone d'intégration considérée pour prendre en compte les réflexions lumineuses mais aussi du nombre de surfaces élémentaires qui la composent.

La détermination de ces deux éléments impose de fixer des paramètres et de faire des hypothèses. Dans notre cas, on a fixé la luminance de la chaussée et le nombre de surfaces élémentaires pour définir la taille de la zone d'intégration des réflexions lumineuses, ce qui peut être discuté.

La seconde partie de cette thèse concerne les usagers et la prise en compte de leurs spécificités d'observation. Afin d'être capable d'évaluer si une installation d'éclairage convient à tous les usagers de l'espace public, quel que soit leur mode de locomotion, nous avons cherché à savoir où se porte notre regard sur le sol lors de nos déplacements. Pour cela, nous avons mis au point une expérimentation en réalité virtuelle qui nous a permis de déduire des angles d'observation moyens pour chaque type d'usagers. On a ensuite inclus la possibilité de changer l'angle d'observation dans notre logiciel de calcul en implémentant la notion d'observateur mobile. Ainsi, on a pu évaluer l'impact du changement de la géométrie d'observation sur les critères de qualité d'une installation d'éclairage et sur le critère de visibilité. Ces derniers ont également été estimés par des mesures sur un site expérimental. On a considéré un angle d'observation de 1° pour les automobilistes sur route interurbaine, un angle de 3° pour les automobilistes en ville et les cyclistes, et un angle de 5° pour les piétons. Les résultats ont montré une diminution de la luminance moyenne perçue par l'utilisateur lorsque l'angle d'observation augmente. Cependant, cette diminution n'affecte pas ni les critères d'uniformité, ni la visibilité. Cela semble dire qu'un dimensionnement d'éclairage urbain avec un angle α de 1° qui atteint les valeurs de performance préconisées et un critère de visibilité satisfaisant, ne doit pas poser de problème de sécurité pour les usagers de l'espace public (qui regardent plutôt avec un angle de 3°).

Pour les classes d'éclairage M3, M4 et M5, les plus répandues en urbain, nous avons donc simulé cinq couples revêtement/éclairage différents et nous avons évalué leurs performances. Les résultats ont confirmé nos hypothèses : en utilisant la méthodologie classique ($\alpha = 1^\circ$) pour dimensionner une installation d'éclairage en ville, un éclairagiste qui atteint les valeurs préconisées apporte assez de visibilité aux usagers, qui ont un angle α de 3° , pour assurer leur sécurité. Cela nous a alors amené à étudier une proposition d'adaptation des recommandations actuelles : le déclassement d'un rang pour les classes d'éclairage M lorsqu'on dimensionne une installation d'éclairage en ville de façon standard (c'est-à-dire avec $\alpha = 1^\circ$). Les performances simulées pour nos cinq couples revêtement/éclairage laissent penser qu'un déclassement est envisageable sans engendrer de gros impacts sur

la visibilité des usagers. Il est tout de même nécessaire d’approfondir nos études. Pour cela, nous prévoyons de simuler les performances obtenues avec d’autres couples revêtement/éclairage et de valider la possibilité d’un déclassement par des expérimentations avec sujets en évaluant leur visibilité et leur confort visuel.

Dans l’optique où des études complémentaires valideraient le déclassement d’un rang, celui-ci permettrait des économies d’énergie de 25 % pour un déclassement de M3 à M4, de 33 % pour M4 à M5, et de 40 % pour M5 à M6, par rapport à un dimensionnement classique. Additionner à une meilleure prise en compte des revêtements, on pourrait même atteindre des chiffres supérieurs. De telles économies ne sont pas négligeables à l’heure actuelle où la production d’électricité soulève de plus en plus de débats et où l’on se retrouve à envisager des coupures de courant en plein hiver.

Par ailleurs, même si cette thèse s’est particulièrement intéressée à ce qui se passe de nuit, nous savons que le revêtement joue également un rôle de jour. En effet, le choix des matériaux a un impact sur le confort et la sécurité des usagers. Des revêtements de couleurs différentes peuvent améliorer la lisibilité de l’espace urbain en matérialisant au sol les espaces dédiés aux différents usages. Cette distinction est notamment due à la notion de contraste coloré. En effet, deux revêtements mis côte à côte peuvent renvoyer la même luminance à l’observateur mais se distinguer par leur couleur.

Pour s’en persuader, on a tracé sur la Figure 6.1 deux bandes de couleur différentes mais de même luminance. Les coordonnées colorimétriques dans l’espace CIELAB de la bande de gauche sont $(L^*; a^*; b^*) = (25,0; -45,9; 17,1)$ et ceux de la bande droite sont $(L^*; a^*; b^*) = (25,0; 61,3; 7,4)$. Mis à part si vous êtes atteint de dyschromatopsie¹, vous devez distinguer deux bandes sur l’image de gauche de la Figure 6.1. Cependant, lorsqu’on étudie cette image en luminance seulement, comme si on mesurait le contraste visuel d’une bande d’éveil de vigilance par exemple, plus aucune distinction n’est visible entre les deux bandes (cf. image de droite sur la Figure 6.1). On voit ainsi que le contraste en luminance n’apporte pas la totalité de l’information sur la visibilité d’un objet et que c’est bel et bien la couleur qui nous permet de distinguer deux éléments.

1. La dyschromatopsie est une altération de la perception des couleurs.

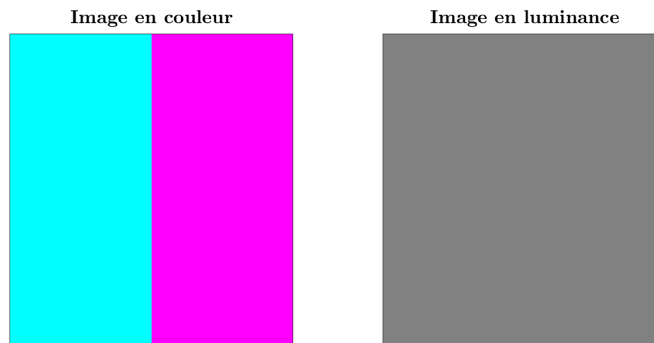


FIGURE 6.1 – Images en couleur et en luminance de deux objets de couleurs différentes.

Ainsi, même si la couleur n'est que très peu évaluée dans les domaines des routes et de l'éclairage public, nous pensons qu'il peut être intéressant d'étudier son évolution dans le temps selon le type de revêtement. Cela permet d'appréhender d'éventuelles diminutions de contraste et donc de faire les bons choix d'aménagements au préalable. Nous avons également trouvé une possible corrélation entre l'albédo des revêtements et leur coordonnée colorimétrique L^* . Celle-ci nécessite un approfondissement de nos investigations mais si elle s'avérait exister, une approximation de l'albédo pourrait alors être faite à partir d'une simple mesure de couleur, mesure plus accessible en termes d'instrumentation et de contraintes expérimentales que celle de l'albédo. Ainsi, la mesure au colorimètre nous permettrait d'avoir accès à deux informations : la couleur et l'albédo du revêtement. Cette estimation de l'albédo pourrait ensuite être utilisée dans des calculs thermiques en lien et place de valeurs standardisées pour évaluer l'impact du revêtement de jour. De plus, ayant évalué l'effet du vieillissement naturel sur la couleur, il serait possible d'évaluer l'effet du vieillissement naturel sur l'albédo d'une chaussée. Cela permettrait d'évaluer l'impact de l'aménagement urbain sur le confort thermique de l'utilisateur, complétant ainsi les calculs d'éclairage nocturnes et les évaluations esthétiques et diurnes réalisées à l'aide de scènes virtuelles par exemple.

En somme, l'aménagement urbain est une affaire de compromis entre les enjeux diurnes et nocturnes de sécurité, d'esthétisme et de confort. L'utilisation d'un revêtement poreux permet de capter l'eau et donc de rafraîchir l'air ambiant pour un meilleur confort thermique de jour. Cependant, il est aussi un piège à lumière et demande d'augmenter l'éclairage la nuit. De leur côté, les revêtements plus clairs réfléchissent mieux la lumière et sont donc utilisés pour optimiser la visibilité et diminuer l'énergie dépensée dans l'éclairage.

rage. Aussi, ils ont un albédo élevé et réfléchissent beaucoup plus le rayonnement solaire, de sorte qu'ils se réchauffent moins rapidement, c'est pourquoi ils sont préférés pour lutter contre les effets d'îlots de chaleur urbain. Toutefois, ces matériaux sont souvent plus onéreux et demandent donc de faire des simulations d'éclairage et des calculs thermiques pour évaluer si les communes peuvent bénéficier d'un retour sur investissement. Également, il faudrait évaluer leur impact de jour sur le confort des usagers car les revêtements clairs peuvent parfois être source d'éblouissement par exemple. Enfin, des revêtements de couleurs différentes permettent une meilleure lisibilité de l'espace public le jour grâce au contraste qui délimite les différentes zones. Néanmoins, lorsque l'éclairage routier est allumé la nuit, nous sommes dans le domaine de vision mésopique et la perception des couleurs diminue du fait de la baisse de sensibilité des cônes. Le contraste coloré est donc moindre.

Pour conclure, revenons sur ce qui est à l'origine de ces travaux de thèse, c'est-à-dire l'éclairage public. Il est aujourd'hui au cœur de discussions sur la transition écologique et à l'origine de questionnements. Nos recherches ont montré qu'il est nécessaire que les pratiques actuelles évoluent pour répondre au mieux aux besoins des usagers, sans abus de lumière artificielle. Il est indispensable de ne plus considérer l'éclairage seul mais plutôt le couple revêtement/éclairage puisque nous avons vu que la surface de la chaussée a un impact sur les performances d'une installation. Aussi, mieux prendre en compte les usagers est primordial. L'éclairage se doit de répondre aux besoins de visibilité de chacun et, additionner à une meilleure prise en compte du couple revêtement/éclairage, considérer les usagers favorise un éclairage « juste », aux bons endroits et en quantité maîtrisée. L'éclairage est selon moi un acteur de la vie urbaine nocturne, moment privilégié pour une vie en société où sont mis en avant les rencontres, les sorties culturelles et les loisirs. Il me semble donc important de réfléchir à sa conception et à son utilisation de façon raisonnée pour faire concorder bien-être social et pérennité de notre habitat, notre chère planète Terre.

BIBLIOGRAPHIE

- Abd-Alhamid, F., Kent, M., Bennett, C., Calautit, J., & Wu, Y. (2019). Developing an Innovative Method for Visual Perception Evaluation in a Physical-Based Virtual Environment. *Building and Environment*, *162*, 106278. doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106278
- Abdo, J., Batista, F., Carré, D., Christory, J.-P., Depetrini, A., Gandon-Léger, P., & Peret, M. (2010). Démarche innovante « Revêtement et lumière » de l'idée à la pratique. *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes (RGRA)*, *885*, 49–53.
- Adrian, W. (1969). Die unterschiedsempfindlichkeit des auges und die möglichkeit ihrer berechnung [calculating the contrast sensitivity of the eye]. *Lichttechnik*, *21* (1), 2A–71.
- Adrian, W. (1987). Visibility levels under night-time driving conditions. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, *16*, 3–12.
- Adrian, W. (1989). Visibility of targets : model for calculation. *Lighting Research & Technology*, *21*, 181–188.
- AFE. (2002). *Recommandations relatives à l'éclairage des voies publiques* (Rapport technique). Paris : Association Française de l'Éclairage.
- AFE. (2019). *Fiche 1 - Éclairage dans les collectivités : les chiffres clés* (Rapport technique). Association Française de l'Éclairage.
- Aletta, F., Xiao, J., & Dima, I. (Eds.). (2018). *Handbook of Research on Perception-Driven Approaches to Urban Assessment and Design*. IGI Global. doi: 10.4018/978-1-5225-3637-6
- Alferdinck, J. W. A. M. (2006). Target detection and driving behaviour measurements in a driving simulator at mesopic light levels. *Ophthalmic and Physiological Optics*, *26*(3), 264–280.

-
- Allahyari, T., Saraji, G. N., Adl, J., Hosseini, M., Younesian, M., & Iravani, M. (2007). Useful field of view and risk of accident in simulated car driving. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 4(2), 133–138.
- ANSI/IESNA. (1990). *American national standard practice for roadway lighting*. (Rapport technique N° RP-8-90). New York, USA : Illuminating Engineering Society of North America.
- ANSI/IESNA. (2000). *American national standard practice for roadway lighting* (Rapport technique N° RP-8-00). New York, USA : Illuminating Engineering Society of North America.
- ANSI/IESNA. (2014). *Roadway lighting* (Rapport technique N° RP-8-14). New York, USA : Illuminating Engineering Society of North America.
- Aulhorn, E. (1964). Graefes Archiv für Klinische und Experimentelle Ophthalmologie. , 167(1), 4.
- Bacelar, A., Lecocq, J., Cariou, J., & Hamard, M. (1999). Étude d'un modèle de visibilité pour le calcul des installations d'éclairage public. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*(222), 23–30.
- Berek, M. (1943). Zum physiologischen grundgesetz der wahrnehmung von lichtreizen. *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 63, 297–309.
- Bhise, V., & McMahan, P. (1976). Predicting target - detection distance with headlights. *Transportation Research Records*, 611, 1–11.
- BIPM. (2019). *Principles governing photometry (2nd edition)* (Rapport technique). Bureau International des Poids et Mesures.
- Blackwell, H. R. (1946). Contrast thresholds of the human eye. *Journal of the Optical Society of America*, 36, 624–643.
- Boletsis, C. (2017, décembre). The New Era of Virtual Reality Locomotion : A Systematic Literature Review of Techniques and a Proposed Typology. *Multimodal Technologies and Interaction*, 1(4), 24. doi: 10.3390/mti1040024
- Borderie, V., Touzeau, O., Bourcier, T., & Laroche, L. (2005). Physiologie de la cornée. *EMC - Ophthalmologie*, 2(2), 103–117. doi: 10.1016/j.emcop.2004.11.001

-
- Boucher, V., & Greffier, F. (2022). Space of basis functions to retrieve road surface reflection tables from luminance maps. *Lighting Research & Technology*. doi: 10.1177/14771535221094275
- Boucher, V., Lileke, S., Lebouc, L., & Greffier, F. (2022). Road BRDF Construction From Measured R-Tables. In *Proceedings of the 2021 Joint Conference - 11th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting & 17th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (EEDAL/LS :17)*. Toulouse, France.
- Boucheron, P., & Reculin, S. (2022). Abolir la nuit. *Faire l'histoire, ARTE*. Consulté le 27-09-2022, sur <https://www.arte.tv/fr/videos/108505-002-A/faire-l-histoire/> (disponible en ligne du 23/09/2022 au 03/08/2026)
- Bouguila, L., Evequoz, F., Courant, M., & Hirsbrunner, B. (2004). Walking-pad : a step-in-place locomotion interface for virtual environments. In *Proceedings of the 6th international conference on Multimodal interfaces - ICMI '04* (p. 77). State College, PA, USA : ACM Press. doi: 10.1145/1027933.1027948
- Boyce, P. R. (2014). *Human Factors in Lighting, Third Edition*. CRC Press.
- Brémond, R. (2020). Visual Performance Models in Road Lighting : A Historical Perspective. *LEUKOS*, 0(0), 1–30. doi: 10.1080/15502724.2019.1708204
- Brémond, R., Bodard, V., Dumont, E., & Nouailles-Mayeur, A. (2013). Target visibility level and detection distance on a driving simulator. *Lighting Research & Technology*, 45, 76–89.
- Brémond, R., Dumont, E., Ledoux, V., & Mayeur, A. (2011). Photometric measurements for visibility level computations. *Lighting Research & Technology*, 43, 119–128.
- BSI. (1928). *BSS 307 :1928 - British Standard Specification for Street Lighting* (Rapport technique). London : British Standards Institution.
- BSI. (1931). *BSS 307 :1931 - British Standard Specification for Street Lighting* (Rapport technique). London : British Standards Institution.
- Buyukkinaci, B., Onaygil, S., Guler, O., & Yurtseven, M. B. (2018). Determining minimum visibility levels in different road lighting scenarios. *Lighting Research & Technology*, 50, 1045–1056.

-
- Buyukkinaci, B., Onaygil, S., Yurtseven, M. B., & Guler, O. (2019). Effect of background luminance calculation on vl value. In (pp. 1782–1786). CIE.
- Carnis, J. (2017). La porcelaine, une affaire qui roule. *Le Moniteur*. Consulté sur <https://www.lemoniteur.fr/article/la-porcelaine-une-affaire-qui-roule.594974>
- CEN. (2015a). *EN 13201-1 :2015. Road Lighting – Part 1 : Guidelines on selection of lighting classes* (Norme). Brussels, Belgium : Comité Européen de Normalisation.
- CEN. (2015b). *EN 13201-2 :2015. Road Lighting – Part 2 : Performance requirements* (Norme). Brussels, Belgium : Comité Européen de Normalisation.
- CEN. (2015c). *EN 13201-3 :2015. Road Lighting - Part 3 : Calculation of performance* (Norme). Brussels, Belgium : Comité Européen de Normalisation.
- CEN. (2015d). *EN 13201-4 :2015. Road Lighting – Part 4 : Methods of measuring lighting performance* (Norme). Brussels, Belgium : Comité Européen de Normalisation.
- Cerema. (2018). *Revêtements des espaces publics* (Guide technique). (Collection Références)
- Chain, C., Lopez, F., & Verny, P. (2007). Impact of real road photometry on public lighting design. In *Proceedings of the 26th Session of the CIE*. Beijing, China : Commission internationale de l'Éclairage.
- Chain, C., & Marchaut, V. (2008). R-tables for other observation angles : specific needs for two applications in the field of public lighting. In *Proceedings of the 2nd cie expert symposium on "advances in photometry and colorimetry"*. Turin, Italie.
- Chamilothori, K., Wienold, J., & Andersen, M. (2019). Adequacy of Immersive Virtual Reality for the Perception of Daylit Spaces : Comparison of Real and Virtual Environments. *LEUKOS*, 15(2-3), 203–226. doi: 10.1080/15502724.2017.1404918
- Chen, Y., Cui, Z., & Hao, L. (2019). Virtual reality in lighting research : Comparing physical and virtual lighting environments. *Lighting Research & Technology*, 51(6), 820–837. doi: 10.1177/1477153518825387
- Chen, Z., Tu, Y., Wang, Z., Liu, L., Wang, L., Lou, D., . . . Teunissen, K. (2019). Target visibility under mesopic vision using a driving simulator. *Lighting Research & Technology*, 51(6), 883–899. doi: 10.1177/1477153518791334

-
- Christory, J.-P., Batista, F., Gandon-Léger, P., & Talbourdet, P. (2014). « Pavements and light » for the right lighting : contribution of concrete pavements. In *Proceedings of the 12th international symposium on concrete roads*. Prague, République Tchèque.
- CIE. (1926). Proceedings of the 6th Session (Geneva, 1924). Commission Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (1932). Proceedings of the 8th Session (Cambridge, 1931). Commission Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (1952). Proceedings of the 12th Session (Stockholm, 1951). Commission Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (1964). Proceedings of the 15th Session (Vienna, 1963). Commission Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (1965a). *CIE 012:1965 - Recommandations internationales pour l'éclairage des voies publiques* (Rapport technique). Vienna : Comité Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (1965b). *Recommandations internationales pour l'éclairage des voies publiques* (Rapport technique N° 12). Vienna : Commission Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (1972). *An unified framework of methods for evaluating visual performance aspects of lighting* (Rapport technique N° 19). Commission Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (1976). *CIE 030:1976 - Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting* (Rapport technique N° 30). Vienna : Comité Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (1978). *CIE 15 supp 2 - Recommendations on uniform color spaces, color-difference equations, psychometric color terms*. (Rapport technique). Vienna : Commission Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (1981a). *An analytical model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance. Volume 1 : Technical foundations* (Rapport technique N° 19/2.1). Commission Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (1981b). *An analytical model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance. Volume 2 : Summary and application guidelines* (Rapport technique N° 19/2.2). Commission Internationale de l'Éclairage.

-
- CIE. (1982). *CIE 030:1982 - Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting* (2^e éd.; Rapport technique N° 30/2). Vienna : Comité Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (1990). *History of the CIE : 1913 - 1988* (Rapport technique). Vienna : Comité Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (1992). *CIE 093:1992 - Road lighting as an accident countermeasure* (Rapport technique N° 93). Vienna : Commission Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (1995). *Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic* (Rapport technique N° 115). Vienna : Commission Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (2001). *CIE 144:2001 - Road surface and road marking reflection characteristics* (Rapport technique N° 144). Vienna : Commission Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (2010a). *CIE 115:2010 - Lighting of roads for motor and pedestrian traffic* (2^e éd.; Rapport technique N° 115). Vienna : Comité Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (2010b). *CIE 191:2010 - Recommended system for mesopic photometry based on visual performance* (Rapport technique). Vienna : Comité Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (2011). *On site measurement of the photometric properties of road and tunnel lighting* (Rapport technique N° 194). Vienna : Commission Internationale de l'Éclairage.
- CIE. (2018). *CIE 015:2018 Colorimetry, 4th Edition* (Rapport technique). Vienna : Commission Internationale de l'Éclairage. doi: 10.25039/TR.015.2018
- CIE. (2019a). *CIE 018:2019 - The Basis of Physical Photometry, 3rd Edition* (Rapport technique). Vienna : Commission Internationale de l'Éclairage. doi: 10.25039/TR.018.2019
- CIE. (2019b). *CIE 140:2019 Road Lighting Calculations, 2nd Edition* (Rapport technique N° 140). Vienna : International Commission on Illumination (CIE). (TC 4-15) doi: 10.25039/TR.140.2019
- CIE. (2021). *CIE 243:2021 - Discomfort Glare in Road Lighting and Vehicle Lighting* (Rapport technique N° 243). Vienna : Commission Internationale de l'Éclairage. doi: 10.25039/TR.243.2021

-
- CIE, & PIARC. (1984). *CIE 066:1984 - Road surfaces and lighting* (Rapport technique). International Commission on Illumination.
- Colombet, F., Paillot, D., Mérienne, F., & Kemeny, A. (2010). Impact of Geometric Field Of View on Speed Perception. In (p. 12). France : Les Collections de l'INRETS.
- Coulomb, J., & Brusque, C. (1996). Propriétés de réflexion des surfaces - le goniométre du LCPC - performances et perspectives d'études. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*(204), 22–35.
- Crundall, D., Underwood, G., & Chapman, P. (1999). Driving Experience and the Functional Field of View. *Perception*, 28(9), 1075–1087. doi: 10.1068/p281075
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V., & Hart, J. C. (1992). The CAVE : audio visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM*, 35(6), 64–72. doi: 10.1145/129888.129892
- Danyluk, K., & Willett, W. (2019). Evaluating the Performance of Virtual Reality Navigation Techniques for Large Environments. In M. Gavrilova, J. Chang, N. M. Thalmann, E. Hitzer, & H. Ishikawa (Eds.), *Advances in Computer Graphics* (Vol. 11542, pp. 203–215). Cham. (Lecture Notes in Computer Science) doi: 10.1007/978-3-030-22514-8_17
- Davoudian, N., & Raynham, P. (2012). What do pedestrians look at at night? *Lighting Research & Technology*, 44(4), 438–448. doi: 10.1177/1477153512437157
- De Boer, J., Oñate, V., & Oostrijck, A. (1952). Practical Methods for Measuring and Calculating the Luminance of Road Surfaces. *Philips Research Reports*, 7, 54–76.
- De Boer, J., & Westermann, H. (1964). Caractérisation et classification des revêtements routiers du point de vue de la luminance en éclairage public. *Lux*, 30, 385.
- Donzallaz, P. Y. (2019). Create High-Quality Light Fixtures in Unity. *Unity Technologies*, 48.
- Dumont, E., Joulan, K., & Ledoux, V. (2011). Tabulation and completion of measured BRDF data for lighting computations. In *Proceedings of the 27th session of the CIE* (pp. 1155–1163).

-
- Dumont, E., & Paumier, J.-L. (2007). Are standard tables r still representative of the properties of road surfaces in France? In *Proceedings of the 26th session of the CIE*. Beijing, China : CIE.
- Dunbar, C. (1938). Necessary Values of Brightness Contrast in Artificially Lighted Streets. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, 3(12), 187–195. doi: 10.1177/147715353800301204
- Field, A. (2013). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. SAGE.
- Foloppe, D. A., Richard, P., Yamaguchi, T., Etcharry-Bouyx, F., & Allain, P. (2018). The potential of virtual reality-based training to enhance the functional autonomy of Alzheimer’s disease patients in cooking activities : A single case study. *Neuropsychological Rehabilitation*, 28(5), 709–733. doi: 10.1080/09602011.2015.1094394
- Fotios, S., & Cheal, C. (2013). Using obstacle detection to identify appropriate illuminances for lighting in residential roads. *Lighting Research & Technology*, 45, 362–376.
- Fotios, S., & Gibbons, R. B. (2018). Road lighting research for drivers and pedestrians : The basis of luminance and illuminance recommendations. *Lighting Research & Technology*, 50(1), 154–186. doi: 10.1177/1477153517739055
- Fotios, S., & Uttley, J. (2018). Illuminance required to detect a pavement obstacle of critical size. *Lighting Research & Technology*, 50(3), 390–404. doi: 10.1177/1477153516659783
- Fotios, S., Uttley, J., Cheal, C., & Hara, N. (2015). Using eye-tracking to identify pedestrians’ critical visual tasks, Part 1. Dual task approach. *Lighting Research & Technology*, 47(2), 133–148. doi: 10.1177/1477153514522472
- Fotios, S., Uttley, J., & Yang, B. (2015). Using eye-tracking to identify pedestrians’ critical visual tasks. Part 2. Fixation on pedestrians. *Lighting Research & Technology*, 47(2), 149–160. doi: 10.1177/1477153514522473
- Foulsham, T., Walker, E., & Kingstone, A. (2011). The where, what and when of gaze allocation in the lab and the natural environment. *Vision Research*, 51(17), 1920–1931. doi: 10.1016/j.visres.2011.07.002

-
- Gac, P., Richard, P., Papouin, Y., George, S., & Richard, E. (2019). Simulation Tools for the Design of Virtual Training Environments. In *Proceeding of the 1st International Conference for Multi-Area Simulation ICMASim 2019* (pp. 293–298). Angers, France. doi: 10.3389/978-2-88963-088-2
- Galatanu, C., & Canale, L. (2020). Measurement of reflectance properties of asphalt using photographic methods. In *2020 IEEE international conference on environment and electrical engineering and 2020 IEEE industrial and commercial power systems europe (EEEIC / i&CPS europe)* (pp. 1–6). IEEE.
- Gallagher, V. P., & Meguire, P. G. (1975). Driver visual needs in night driving. *Washington DC : Transportation Research Board.*, 156.
- Gibbons, R. (1998). *Influence of pavement reflection on target visibility* (Thèse). University of Waterloo.
- Gibson, K. S., & Tyndall, E. P. T. (1923). *Visibility of radiant energy* (NIST Research Library éd., Vol. 19) (N° 475). National Bureau of Standards.
- Goodman, T., Forbes, A., Walkey, H., Eloholma, M., Halonen, L., Alferdinck, J., ... Szalmas, A. (2007). Mesopic visual efficiency IV : a model with relevance to nighttime driving and other applications. *Lighting Research and Technology*, 35, 365–392.
- Goyat, Y., & Guillard, Y. (2002). Mesures sur site des coefficients réduits de luminance des chaussées au moyen de COLUROUTE. *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes (RGRA)*, 812.
- Greffier, F. (2022). *Mesures photométriques et colorimétriques en conditions dynamiques par imagerie hdr : application à l'optimisation des installations d'éclairage routier*. (Thèse de doctorat en Signal, Image, Automatique). Université Gustave Eiffel.
- Greffier, F., Muzet, V., Boucher, V., Fournela, F., & Dronneau, R. (2019). Use of an imaging luminance measuring device to evaluate road lighting performance at different angles of observations. In *Proceedings of the 29th Quadrennial Session of the CIE* (pp. 553–562). Washington DC, USA : Commission Internationale de l'Éclairage. doi: 10.25039/x46.2019.OP75

-
- Greffier, F., Muzet, V., Boucher, V., Fournela, F., & Lebouc, L. (2021). Influence of Pavement Heterogeneity and Observation Angle on Lighting Design : Study with New Metrics. *Sustainability*, *13*, 11789. doi: 10.3390/su132111789
- Greule, R., & Braun, T. (2017). *Psychological effect of lights in an urban environment* (Rapport technique). Hamburg, Germany : Zumtobel Research.
- Guild, J., & Petavel, J. E. (1931). The colorimetric properties of the spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, *230*(681-693), 149–187. doi: 10.1098/rsta.1932.0005
- Güler, O., & Onaygil, S. (2003). The effect of luminance uniformity on visibility level in road lighting. *Lighting Research & Technology*, *35*(3), 199–213.
- Halvorson, C. A. B. (1936). Highway lighting - principles and sources. *Electrical Engineering*, *6*, 735–746.
- Heydarian, A., Carneiro, J., Gerber, D., Becerik-Gerber, B., Hayes, T., & Wood, W. (2015). Immersive virtual environments versus physical built environments : A benchmarking study for building design and user-built environment explorations. *Automation in Construction*, *54*, 116–126. doi: 10.1016/j.autcon.2015.03.020
- Heydarian, A., Pantazis, E., Wang, A., Gerber, D., & Becerik-Gerber, B. (2017). Towards user centered building design : Identifying end-user lighting preferences via immersive virtual environments. *Automation in Construction*, *81*, 56–66. doi: 10.1016/j.autcon.2017.05.003
- Hills, B. L. (1975a). Visibility under night driving conditions : part I, laboratory background and theoretical considerations. *Australian Road Research*, *7*(3), 179–184.
- Hills, B. L. (1975b). Visibility under night driving conditions : part II, field measurements using disc obstacles and a pedestrian dummy. *Australian Road Research*, *7*(4), 251–258.
- Hills, B. L. (1976). Visibility under night driving conditions : part III, derivation of a set of luminance increment visual area night driving characteristics and factors in their application. *Australian Road Research*, *8*(1), 11–26.
- Holladay, L. (1926). The Fundamentals of Glare and Visibility. *Journal of the Optical Society of America*, *12*(4), 271. doi: 10.1364/JOSA.12.000271

-
- Holladay, L. (1927). Action of a Light-Source in the Field of View in Lowering Visibility. *Journal of the Optical Society of America*, 14(1), 1. doi: 10.1364/JOSA.14.000001
- Huteau, H. (2018). Avec un éclairage public à led, des économies au bout du chemin. *La Gazette des Communes*. Consulté sur <https://www.lagazettedescommunes.com/569754/avec-un-eclairage-public-a-led-des-economies-au-bout-du-chemin/>
- ISO/CIE. (2005). *ISO 23539:2005/CIE S 010:2004 - Photometry - The CIE system of physical photometry* (Norme). International Organization for Standardization.
- ISO/CIE. (2014). *ISO/CIE 11664-6:2014 - Colorimetry - Part 6 : CIEDE2000 Colour-difference formula* (Norme). International Organization for Standardization.
- Jeannerod, M. (1977). *Les deux mécanismes de la vision*. Paris : Editions du Seuil - La Recherche.
- Jia, L., Afshari, S., Mishra, S., & Radke, R. (2014). Simulation for pre-visualizing and tuning lighting controller behavior. *Energy and Buildings*, 70, 287–302. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.063
- Joulan, K., Hautiere, N., & Brémond, R. (2011). A unified CSF-based framework for edge detection and edge visibility. In *Proc. cvpr workshop on biologically-consistent vision* (pp. 21–26).
- Judd, D. B. (1951). Report of U.S. Secretariat Committee on Colorimetry and Artificial Daylight. In *Proceedings of the 12th Session of the CIE* (Vol. 1, p. 11). Paris : Bureau Central de la CIE.
- Kemeny, A., & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(1), 31–37. doi: 10.1016/S1364-6613(02)00011-6
- Khan, M. H., Senadheera, S., Gransberg, D. D., & Stemprok, R. (1999). Influence of pavement surface characteristics on nighttime visibility of objects. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1692, 39–48.
- Knapp, J., & Loomis, J. (2003). Visual Perception of Egocentric Distance in Real and Virtual Environments. In L. Hettlinger & M. Haas (Eds.), (pp. 21–46). CRC Press. (Book Title : Virtual and Adaptive Environments) doi: 10.1201/9781410608888.pt1

-
- Käser, D. P., Parker, E., Glazier, A., Podwal, M., Seegmiller, M., Wang, C.-P., . . . Moshier, J. (2017). The making of Google earth VR. In *ACM SIGGRAPH 2017 Talks* (pp. 1–2). New York, NY, USA : Association for Computing Machinery. doi: 10.1145/3084363.3085094
- Lafon, R. (2020). ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS - Impact des revêtements clairs sur les températures. *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes (RGRA)*(972), 30–35.
- Le Point. (2017). *Los Angeles : contre la chaleur, pourquoi ne pas peindre les chaussées en blanc ?* Consulté le 2023-06-06, sur https://www.lepoint.fr/monde/los-angeles-contre-la-chaleur-pourquoi-ne-pas-peindre-les-chaussees-en-blanc-14-08-2017-2149875_24.php
- Lecocq, J. (1991). Visibility levels in outdoor lighting : Adrian model applied to spherical cap targets. In *Proceedings of the 22th session of the cie* (pp. 48–51). Melbourne, Australie.
- Liandrat, S., Muzet, V., Bour, V., Dehon, J., Christory, J.-P., Delaporte, B., . . . Ledoeuff, T. (2022). Pavements, energy efficient actors in public lighting. In *Proceedings of the 9th symposium on pavement surface characteristics - SURF 2022*. Milan, Italy.
- Mackenzie, A. K., & Harris, J. M. (2014). Characterizing visual attention during driving and non-driving hazard perception tasks in a simulated environment. In *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications* (pp. 127–130). Safety Harbor Florida : ACM. doi: 10.1145/2578153.2578171
- Maxwell, J. C. (1855). Experiments on colour, as perceived by the eye, with remarks on colour-blindness. *Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 21(2), 275–298. doi: 10.1017/S0080456800032117
- May, K., Walsh, J., Smith, R., Gu, N., & Thomas, B. (2020). *VRGlare : A Virtual Reality Lighting Performance Simulator for real-time Three-Dimensional Glare Simulation and Analysis*. doi: 10.22260/ISARC2020/0006
- Mayeur, A., Brémond, R., & Bastien, J. M. C. (2010). The effect of the driving activity on target detection as a function of the visibility level : Implications for road lighting. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 13, 115–128.

-
- Mokrzycki, W. S., & Tatol, M. (2011, avril). Colour difference ΔE - a survey. *Machine Graphics & Vision International Journal*, 20(4), 383–411.
- Muzet, V., Bernasconi, J., Iacomussi, P., Liandrat, S., Greffier, F., Blattner, P., ... Lindgren, M. (2020). Review of road surface photometry methods and devices – Proposal for new measurement geometries. *Lighting Research & Technology*, 3(53), 213–229. doi: 10.1177/1477153520958454
- Muzet, V., Colomb, M., Toinette, M., Gandon-Leger, P., & Christory, J.-P. (2019). Towards an optimization of urban lighting through a combined approach of lighting and road building activities. In *Proceedings of the 29th Quadrennial Session of the CIE* (pp. 789–800). Washington DC, USA : Commission internationale de l'Éclairage. doi: 10.25039/x46.2019.PP23
- Muzet, V., Greffier, F., Nicolai, A., Taron, A., & Verny, P. (2018). Evaluation of the performance of an optimized road surface/lighting combination. *Lighting Research & Technology*, 51(4), 576–591. doi: 10.1177/1477153518808334
- Muzet, V., Liandrat, S., Bour, V., Dehon, J., & Christory, J. (2022). Is it possible to achieve quality lighting without considering the photometry of the pavements? *Lighting Research & Technology*. (Publisher : SAGE Publications Ltd STM) doi: 10.1177/14771535221111564
- Muzet, V., Paumier, J.-L., & Guillard, Y. (2008). COLUROUTE : a mobile gonio-reflectometer to characterize the road surface photometry. In (p. 8p).
- Ménard, J., & Cariou, J. (1994). Road lighting : Assessment of an installation based on the contrast of a standard target. *Lighting Research and Technology*, 26(1), 19–22.
- Ménétrier, E., Richard, P., Boucher, V., & Boujon, C. (2017). Using Virtual Reality Techniques to Study Cognitive Processes in Car Driving Activity. In *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications* (pp. 138–145). Porto, Portugal. doi: 10.5220/0006230901380145
- Natephra, W., Motamedi, A., Fukuda, T., & Yabuki, N. (2017). Integrating building information modeling and virtual reality development engines for building indoor lighting design. *Visualization in Engineering*, 5(1), 19. doi: 10.1186/s40327-017-0058-x

-
- Nicolai, A., Verny, P., Muzet, V., Greffier, F., El Baïmrani, P., Tardieux, P., & Lavigne, M. (2016). Le procédé Lumiroute® - Optimisation du couple revêtement et lumière pour éclairer juste. *RGRA*(939), 102–108.
- Ogando-Martínez, A., Troncoso-Pastoriza, F., Eguía-Oller, P., Granada-Álvarez, E., & Erkoreka, A. (2020). Model Calibration Methodology to Assess the Actual Lighting Conditions of a Road Infrastructure. *Infrastructures*, 5(1), 2. doi: 10.3390/infrastructures5010002
- Ogando-Martínez, A., Troncoso-Pastoriza, F., Granada-Álvarez, E., & Eguía-Oller, P. (2020). Ellipsoid-based approximation method for the estimation of the actual reduced luminance coefficients of road surfaces for accurate lighting simulations. *Sustainable Cities and Society*, 63.
- Paille, D., Kemeny, A., & Berthoz, A. (2005). Stereoscopic stimuli are not used in absolute distance evaluation to proximal objects in multicue virtual environment. In *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XII* (Vol. 5664, pp. 596–605). SPIE. doi: 10.1117/12.587744
- Pierard, N., Brichant, P.-P., Denolf, K., Destree, A., De Visscher, J., Vanelstraete, A., & Vansteenkiste, S. (2013). *Les enrobés bitumineux colorés* (Annexe au Bulletin CRR N° 97). Bruxelles, Belgique : Belgian Road Research Centre (BRRC).
- Ployaert, C., & Van Audenhove, P. (2010). *Vers une composition optimale des bétons routiers* (Guide). Bruxelles, Belgique : FEBELCEM (Fédération de l'Industrie Cimentière Belge).
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge ; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13(3), 257–266. doi: 10.1109/TSMC.1983.6313160
- Raynham, P. (2004). An examination of the fundamentals of road lighting for pedestrians and drivers. *Lighting Research & Technology*, 36(4), 307–313. doi: 10.1191/1365782804li125oa
- Rea, M. S. (1986). Toward a model of visual performance : foundations and data. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 15(2), 41–57.

-
- Rea, M. S., Bullough, J. D., Freyssinier-Nova, J. P., & Bierman, A. (2004). A proposed unified system of photometry. *Lighting Research & Technology*, *36*(2), 85–109.
- Rea, M. S., Bullough, J. D., & Zhou, Y. (2010). A method for assessing the visibility benefits of roadway lighting. *Lighting Research & Technology*, *42*(2), 215–241.
- Rea, M. S., & Ouellette, M. J. (1988). Visual performance using reaction times. *Lighting Research & Technology*, *20*, 139–153.
- Rea, M. S., & Ouellette, M. J. (1991). Relative visual performance : A basis for application. *Lighting Research & Technology*, *23*, 135–144.
- Richard, P., Verhulst, E., & Richard, E. (2017). *Réalité virtuelle pour la simulation de conduite de véhicules* (Sécurité routière : un défi à l'aube du XXIe siècle éd. ; T. Gaymard Sandrine & Tiplica, Ed.). L'Harmattan.
- Scorpio, M., Laffi, R., Masullo, M., Ciampi, G., Rosato, A., Maffei, L., & Sibilio, S. (2020). Virtual Reality for Smart Urban Lighting Design : Review, Applications and Opportunities. *Energies*, *13*(15), 3809. doi: 10.3390/en13153809
- Scorpio, M., Laffi, R., Teimoorzadeh, A., Ciampi, G., Masullo, M., & Sibilio, S. (2022). A calibration methodology for light sources aimed at using immersive virtual reality game engine as a tool for lighting design in buildings. *Journal of Building Engineering*, *48*, 103998. doi: 10.1016/j.jobe.2022.103998
- Seymour, J. (2009). Color measurement with an RGB camera. In *Proceedings of Annual Technical Conference TAGA 2009*. The Technical Association of the Graphic Arts.
- Simon, P., Popieul, J.-C., Voillequin, T., & Angué, J.-C. (1999). Description d'un système automatisé de recueil de l'exploration visuelle du conducteur automobile en simulateur. In *Conférence DSC'99*. Paris, France.
- Sivak, M. (1996). The Information That Drivers Use : Is it Indeed 90% Visual ? *Perception*, *25*, 1081–1089. doi: 10.1068/p251081
- Smith, F. C. (1938). Reflection Factors and Revealing Power. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, *3*(12), 196–206. (Publisher : SAGE Publications) doi: 10.1177/147715353800301205

-
- Stiles, W., & Burch, J. (1959). N.P.L. Colour-matching Investigation : Final Report. *Optica Acta : International Journal of Optics*, 6(1), 1–26. doi: 10.1080/713826267
- Stoakley, R., Conway, M. J., & Pausch, R. (1995). Virtual reality on a WIM : interactive worlds in miniature. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '95* (pp. 265–272). Denver, Colorado, United States : ACM Press. doi: 10.1145/223904.223938
- Stockman, A. (2019). Cone fundamentals and CIE standards. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 30, 87–93. doi: 10.1016/j.cobeha.2019.06.005
- Stockmar, A. (2015). Extension of the luminance concept in road and tunnel lighting. In *Proceedings of 28th Quadrennial Session of the CIE* (pp. 751–753). Manchester, United Kingdom : Commission Internationale de l’Eclairage.
- Summala, H., Nieminen, T., & Punto, M. (1996). Maintaining Lane Position with Peripheral Vision during In-Vehicle Tasks. *Human Factors*, 38(3), 442–451. doi: 10.1518/001872096778701944
- Sørensen, K. (1974). *Description and classification of light reflection properties of road surfaces* (Rapport technique N° 7). Denmark : The Danish Illuminating Engineering Laboratory.
- Tahrani, S., Jallouli, J., & Moreau, G. (2005). Towards a Virtual Reality Tool for Lighting Communication and Analysis in Urban Environments. In *Proceedings of the 11th International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures* (p. 10). Vienna, Austria.
- Tinsley, J. N., Molodtsov, M. I., Prevedel, R., Wartmann, D., Espigulé-Pons, J., Lauwers, M., & Vaziri, A. (2016). Direct detection of a single photon by humans. *Nature Communications*, 7(1), 12172. doi: 10.1038/ncomms12172
- Uttley, J., Fotios, S., & Cheal, C. (2017). Effect of illuminance and spectrum on peripheral obstacle detection by pedestrians. *Lighting Research & Technology*, 49(2), 211–227. doi: 10.1177/1477153515602954
- Van Bommel, W. (2015). *Road Lighting : Fundamentals, Technology and Application*. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-11466-8

-
- Van Bommel, W., & Tekelenburg, J. (1986). Visibility research for road lighting based on a dynamic situation. *Lighting Research & Technology*, 18, 37–39.
- Vasylevska, K., Kaufmann, H., Bolas, M., & Suma, E. A. (2013). Flexible spaces : A virtual step outside of reality. In *2013 IEEE Virtual Reality (VR)* (pp. 109–110). Lake Buena Vista, FL : IEEE. doi: 10.1109/VR.2013.6549386
- Viorel, R. A., Lucache, D. D., & Gălăţanu, C. (2019). Calculation of energy economy by dimming LED lamps with maximum performance. In (p. 1-6). IEEE.
- Waldram, J. M. (1938). The revealing power of street lighting installations. *Lighting Research and Technology*, 3, 173–186.
- Waldram, J. M. (1950). The development of street lighting in great britain. *Lighting Research and Technology*, 15, 285–313.
- Wandell, B. A. (1995). *Foundations of vision*. Sunderland, MA, US : Sinauer Associates.
- Winter, J., Fotios, S., & Völker, S. (2017). Gaze direction when driving after dark on main and residential roads : Where is the dominant location? *Lighting Research & Technology*, 49(5), 574–585. doi: 10.1177/1477153516632867
- Wood, L. A. S. (1936). Better visibility needed on highways at night. *Electrical Engineering*, 55, 614–618.
- Wright, W. D. (1929). A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours. *Transactions of the Optical Society*, 30(4), 141. doi: 10.1088/1475-4878/30/4/301
- Zwahlen, H. T. (1985). Driver eye scanning, the information acquisition process and sophisticated in-vehicle information displays and controls. In *Proceedings of the 9th congress of the international ergonomics association* (pp. 508–510). Taylor & Francis.

ANNEXES

A.1 Résultats de mesures et de simulations sur le site expérimental Lumiroute®

Afin d'examiner localement la capacité du couple revêtement/éclairage à révéler la présence d'un obstacle sur la route en situation réelle, nous avons mené une campagne de mesures sur une partie du site expérimental Lumiroute®. Les mesures expérimentales ont été effectuées la nuit du 23 novembre 2021 pour trois combinaisons de revêtement routier et d'éclairage différentes, résumées ci-dessous :

- La section 2a est constituée du revêtement routier Lumiroute® 2 combiné à un éclairage LED avec un flux lumineux de 4600 lumens.
- La section 2b est identique à la section 2a, mais le flux des luminaires LED est réduit d'environ 48 %, soit 2392 lumens.
- La section 4 est composée d'un revêtement routier traditionnel brut combiné à un éclairage composé de sources à décharge aux halogénures métalliques avec un flux de 7837,5 lumens.

Nous avons estimé les performances des configurations en utilisant les critères classiques et le niveau de visibilité d'une cible standard placée en chaque point de la grille normalisée. L'effet du revêtement routier sur la visibilité a également été examiné en annihilant son influence sur la luminance de la cible. Pour chaque configuration, les mesures de luminance ont été effectuées à l'aide d'un appareil de mesure de la luminance par imagerie (ILMD) placé à 60 m devant le maillage normalisé au milieu de la voie lente.

On donne dans cette annexe, pour chaque configuration, les tableaux de mesures et de simulation de :

- l'éclairement horizontal (en lux),

-
- la luminance au sol (en cd.m^{-2}),
 - l'éclairement vertical à 12,5 cm du sol¹ (en lux),
 - la luminance de cible sans prise en compte des réflexions de la lumière sur le revêtement (en cd.m^{-2}),
 - la luminance de fond considérée pour le calcul du niveau de visibilité de cible sans prise en compte des réflexions de la lumière sur le revêtement (en cd.m^{-2}),
 - le niveau de visibilité de cible sans prise en compte des réflexions de la lumière sur le revêtement,
 - la luminance de cible avec prise en compte des réflexions de la lumière sur le revêtement (en cd.m^{-2}),
 - la luminance de fond considérée pour le calcul du niveau de visibilité de cible avec prise en compte des réflexions de la lumière sur le revêtement (en cd.m^{-2}),
 - le niveau de visibilité de cible avec prise en compte des réflexions de la lumière sur le revêtement.

On évalue à chaque fois la moyenne et l'écart-type des écarts entre les mesures et les simulations.

1. Sauf pour la section 2a car le flux des luminaires a changé avant que nous ayons le temps de faire les mesures. Nous n'étions pas maître de cette réduction de flux.

Section 2a										
Éclairéments horizontaux - Mesure										
VRa	29,70	22,76	17,22	12,76	9,84	10,03	12,91	17,51	23,51	27,89
	28,57	21,14	16,09	12,34	9,73	10,12	12,78	16,87	22,64	27,35
	27,89	20,24	15,48	12,00	9,63	10,10	12,14	15,75	21,02	25,50
VLe	23,70	19,20	13,76	10,97	8,95	9,19	11,00	13,84	18,08	21,19
	17,39	14,33	10,96	9,11	7,60	7,82	8,79	10,95	13,93	15,74
	11,32	10,97	8,77	7,29	6,14	6,33	7,09	8,28	10,67	11,10

TABLEAU A.1 – Éclairéments horizontaux mesurés pour la section 2a.

Section 2a										
Éclairéments horizontaux - Simulation										
VRa	17,50	14,61	11,54	8,59	6,87	6,87	8,59	11,54	14,61	17,50
	17,91	14,61	11,18	8,35	6,81	6,81	8,35	11,18	14,61	17,91
	18,46	15,33	11,53	8,63	7,21	7,21	8,63	11,53	15,33	18,46
VLe	17,26	14,80	11,05	8,70	7,47	7,47	8,70	11,05	14,80	17,26
	14,55	12,74	10,10	8,19	7,09	7,09	8,19	10,10	12,74	14,55
	11,13	10,09	8,42	6,95	6,15	6,15	6,95	8,42	10,09	11,13

TABLEAU A.2 – Éclairéments horizontaux simulés pour la section 2a.

	$E_{h_{moyen}}$	U_h	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	14,77 lux	0,42	30 %	20 %
Simulation	11,13 lux	0,55		

TABLEAU A.3 – Comparaison des éclairéments horizontaux obtenus en mesure et en simulation pour la section 2a.

Section 2a										
Luminances au sol - Mesure										
VRa	1,67	1,72	1,81	1,85	1,83	1,72	1,61	1,52	1,43	1,43
	1,45	1,51	1,56	1,55	1,45	1,32	1,28	1,25	1,26	1,40
	1,60	1,65	1,65	1,58	1,46	1,36	1,29	1,26	1,33	1,51
VLe	1,41	1,40	1,32	1,19	1,08	0,99	0,95	0,98	1,13	1,32
	1,05	0,99	0,90	0,82	0,77	0,75	0,77	0,83	0,93	1,02
	0,80	0,72	0,67	0,63	0,60	0,61	0,65	0,72	0,79	0,80

TABLEAU A.4 – Luminances horizontales mesurées pour la section 2a avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 2a										
Luminances au sol - Simulation										
VRa	1,34	1,32	1,32	1,35	1,31	1,28	1,40	1,43	1,39	1,40
	1,37	1,31	1,26	1,28	1,24	1,19	1,31	1,35	1,38	1,41
	1,37	1,30	1,22	1,21	1,16	1,13	1,23	1,30	1,36	1,39
VLe	1,26	1,18	1,08	1,08	1,05	1,02	1,09	1,14	1,24	1,27
	1,04	0,98	0,91	0,91	0,86	0,85	0,93	0,96	1,03	1,04
	0,78	0,76	0,73	0,70	0,66	0,66	0,71	0,75	0,79	0,79

TABLEAU A.5 – Luminances horizontales simulées pour la section 2a avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	L_{moyen}	U_0	U_t	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	1,22 cd.m ⁻²	0,49	0,71	13 %	15 %
Simulation	1,13 cd.m ⁻²	0,58	0,81		

TABLEAU A.6 – Comparaison des luminances obtenues au sol en mesure et en simulation pour la section 2a.

Section 2a										
Luminances de cible sans réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	0,50	0,75	0,82	0,75	0,63	0,56	0,52	0,46	0,37	0,37
	0,52	0,76	0,78	0,73	0,58	0,55	0,51	0,41	0,41	0,36
	0,45	0,72	0,73	0,67	0,57	0,51	0,42	0,37	0,34	0,34
VLe	0,44	0,62	0,64	0,61	0,53	0,47	0,42	0,37	0,29	0,27
	0,32	0,47	0,50	0,53	0,44	0,42	0,36	0,33	0,29	0,23
	0,26	0,37	0,41	0,41	0,38	0,35	0,32	0,26	0,26	0,25

TABLEAU A.7 – Luminances de cibles mesurées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2a avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 2a										
Luminances de cible sans réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	0,24	0,49	0,59	0,52	0,40	0,34	0,27	0,18	0,12	0,08
	0,25	0,50	0,58	0,50	0,39	0,35	0,27	0,18	0,12	0,08
	0,26	0,52	0,59	0,51	0,42	0,37	0,29	0,19	0,12	0,08
VLe	0,24	0,50	0,56	0,51	0,43	0,40	0,30	0,20	0,13	0,09
	0,22	0,43	0,50	0,47	0,40	0,37	0,30	0,20	0,13	0,09
	0,18	0,34	0,41	0,40	0,34	0,33	0,27	0,19	0,13	0,09

TABLEAU A.8 – Luminances de cibles simulées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2a avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{cible_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,47 cd.m ⁻²	80 %	85 %
Simulation	0,32 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.9 – Comparaison des luminances de cible obtenues sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 2a.

Section 2a										
Luminances de fond sans réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	1,77	1,75	1,73	1,64	1,54	1,47	1,44	1,44	1,55	1,63
	1,48	1,57	1,52	1,41	1,48	1,55	1,61	1,47	1,45	1,54
	1,53	1,60	1,61	1,50	1,43	1,49	1,50	1,50	1,51	1,51
VLe	1,31	1,35	1,31	1,24	1,12	1,17	1,20	1,20	1,21	1,21
	0,96	0,96	0,97	0,93	0,85	0,86	0,92	0,90	0,93	0,92
	0,80	0,82	0,83	0,80	0,72	0,69	0,72	0,71	0,73	0,72

TABLEAU A.10 – Luminances de fond mesurées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2a avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 2a										
Luminances de fond sans réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	1,38	1,44	1,53	1,45	1,45	1,45	1,43	1,45	1,40	1,44
	1,28	1,30	1,39	1,41	1,37	1,37	1,40	1,39	1,35	1,38
	1,24	1,29	1,32	1,40	1,39	1,34	1,41	1,40	1,33	1,39
VLe	1,13	1,18	1,17	1,29	1,31	1,24	1,31	1,31	1,25	1,25
	1,03	0,98	0,96	1,03	1,06	1,01	1,09	1,10	1,05	1,05
	0,78	0,76	0,73	0,74	0,74	0,78	0,81	0,81	0,79	0,79

TABLEAU A.11 – Luminances de fond simulées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2a avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{fond_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	1,25 cd.m ⁻²	10 %	12 %
Simulation	1,20 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.12 – Comparaison des luminances de fond obtenues sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 2a.

Section 2a										
VL sans réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	-13,77	-10,29	-8,87	-8,48	-8,56	-8,29	-7,99	-8,02	-8,74	-8,57
	-12,27	-9,56	-8,28	-7,28	-8,97	-9,21	-9,47	-8,88	-8,35	-8,48
	-13,82	-10,57	-9,84	-8,85	-8,68	-9,40	-9,68	-9,64	-9,32	-8,77
VLe	-12,68	-9,85	-8,71	-7,73	-6,97	-7,67	-8,02	-8,12	-8,39	-8,04
	-11,38	-8,34	-7,37	-6,03	-5,79	-5,99	-6,95	-6,63	-6,87	-7,04
	-10,42	-8,28	-7,22	-6,35	-5,28	-5,10	-5,55	-6,01	-5,87	-5,73

TABLEAU A.13 – Niveaux de visibilité mesurés sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2a avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 2a										
VL sans réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	-34,49	-26,99	-25,08	-23,48	-24,95	-24,71	-24,37	-25,25	-24,20	-24,24
	-31,40	-22,92	-21,89	-22,76	-23,26	-22,81	-23,87	-24,10	-23,28	-23,26
	-29,92	-21,97	-19,60	-22,25	-23,16	-21,65	-23,59	-24,13	-22,73	-23,28
VLe	-26,93	-19,29	-16,37	-19,53	-20,93	-18,78	-21,20	-22,19	-21,02	-20,88
	-24,87	-15,61	-12,13	-14,10	-15,52	-14,35	-16,54	-17,88	-17,33	-17,13
	-18,37	-11,88	-8,41	-8,59	-9,33	-10,15	-11,36	-12,36	-12,45	-12,63

TABLEAU A.14 – Niveaux de visibilité simulés sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2a avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	VL_{moyen}	$ VL > 7$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	-8,42	76,67 %	140 %	43 %
Simulation	-20,29	100,00 %		

TABLEAU A.15 – Comparaison des niveaux de visibilité obtenus sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 2a.

Section 2a										
Luminances de cible avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	0,61	0,80	0,86	0,82	0,64	0,60	0,55	0,48	0,42	0,36
	0,55	0,83	0,80	0,71	0,60	0,57	0,53	0,41	0,37	0,42
	0,55	0,77	0,79	0,70	0,59	0,55	0,45	0,44	0,39	0,41
VLe	0,48	0,68	0,71	0,64	0,53	0,52	0,45	0,42	0,34	0,32
	0,37	0,56	0,55	0,54	0,46	0,42	0,41	0,33	0,29	0,27
	0,28	0,44	0,44	0,47	0,39	0,39	0,35	0,29	0,28	0,23

TABLEAU A.16 – Luminances de cibles mesurées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2a avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 2a										
Luminances de cible avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	0,29	0,54	0,63	0,55	0,42	0,37	0,29	0,21	0,15	0,13
	0,30	0,55	0,61	0,53	0,41	0,37	0,29	0,20	0,15	0,13
	0,31	0,57	0,63	0,54	0,44	0,40	0,31	0,22	0,16	0,14
VLe	0,30	0,55	0,60	0,54	0,45	0,42	0,33	0,23	0,17	0,14
	0,26	0,47	0,54	0,50	0,43	0,40	0,33	0,23	0,16	0,13
	0,21	0,38	0,44	0,42	0,37	0,35	0,29	0,22	0,16	0,12

TABLEAU A.17 – Luminances de cibles simulées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2a avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{cible_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,47 cd.m ⁻²	61 %	52 %
Simulation	0,35 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.18 – Comparaison des luminances de cible obtenues en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 2a.

Section 2a										
Luminances de fond avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	1,77	1,75	1,73	1,64	1,54	1,47	1,44	1,44	1,55	1,63
	1,48	1,57	1,52	1,41	1,48	1,55	1,61	1,47	1,45	1,54
	1,53	1,60	1,61	1,50	1,43	1,49	1,50	1,50	1,51	1,51
VLe	1,31	1,35	1,31	1,24	1,12	1,17	1,20	1,20	1,21	1,21
	0,96	0,96	0,97	0,93	0,85	0,86	0,92	0,90	0,93	0,92
	0,80	0,82	0,83	0,80	0,72	0,69	0,72	0,71	0,73	0,72

TABLEAU A.19 – Luminances de fond mesurées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2a avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 2a										
Luminances de fond avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	1,38	1,44	1,53	1,45	1,45	1,45	1,43	1,45	1,40	1,44
	1,28	1,30	1,39	1,41	1,37	1,37	1,40	1,39	1,35	1,38
	1,24	1,29	1,32	1,40	1,39	1,34	1,41	1,40	1,33	1,39
VLe	1,13	1,18	1,17	1,29	1,31	1,24	1,31	1,31	1,25	1,25
	1,03	0,98	0,96	1,03	1,06	1,01	1,09	1,10	1,05	1,05
	0,78	0,76	0,73	0,74	0,74	0,78	0,81	0,81	0,79	0,79

TABLEAU A.20 – Luminances de fond simulées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2a avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{fond,moyen}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	1,25 cd.m ⁻²	10 %	12 %
Simulation	1,20 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.21 – Comparaison des luminances de fond obtenues en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 2a.

Section 2a										
VL avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	-34,88	-26,68	-22,92	-20,23	-21,19	-19,19	-18,49	-18,77	-20,97	-22,40
	-27,92	-20,93	-18,85	-17,37	-20,56	-21,59	-22,59	-20,90	-20,18	-19,77
	-29,58	-23,60	-21,63	-19,88	-19,67	-20,76	-21,91	-21,00	-20,86	-19,51
VLe	-25,01	-18,88	-15,98	-14,89	-13,87	-14,24	-15,77	-15,31	-16,25	-15,84
	-17,57	-11,41	-10,97	-9,68	-9,05	-9,81	-10,78	-11,30	-11,86	-11,62
	-15,58	-10,82	-10,20	-8,27	-7,54	-6,64	-7,62	-8,32	-8,36	-8,47

TABLEAU A.22 – Niveaux de visibilité mesurés en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2a avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 2a										
VL avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	-32,91	-25,66	-24,03	-22,69	-24,39	-24,22	-23,87	-24,69	-23,55	-23,34
	-29,76	-21,57	-20,86	-21,99	-22,70	-22,32	-23,39	-23,55	-22,62	-22,35
	-28,20	-20,55	-18,52	-21,45	-22,57	-21,13	-23,08	-23,55	-22,02	-22,32
VLe	-25,28	-17,91	-15,33	-18,73	-20,32	-18,22	-20,66	-21,61	-20,31	-19,95
	-23,45	-14,40	-11,17	-13,34	-14,93	-13,82	-16,02	-17,32	-16,69	-16,34
	-17,25	-10,90	-7,59	-7,94	-8,81	-9,67	-10,90	-11,86	-11,89	-12,00

TABLEAU A.23 – Niveaux de visibilité simulés en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2a avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	VL_{moyen}	$ VL > 7$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	-17,11	98,33 %	21 %	19 %
Simulation	-19,47	100,00 %		

TABLEAU A.24 – Comparaison des niveaux de visibilité obtenus en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 2a.

Section 2b										
Éclairéments horizontaux - Mesure										
VRa	15,17	11,85	8,73	6,60	5,15	5,26	6,71	9,17	12,17	14,51
	14,33	11,14	8,38	6,43	5,11	5,33	6,59	8,82	11,80	14,19
	13,52	10,61	7,93	6,29	5,07	5,27	6,33	8,27	10,96	13,24
VLe	11,55	9,36	7,02	5,70	4,73	4,93	5,75	7,28	9,43	11,09
	8,53	7,36	5,58	4,80	4,00	4,11	4,66	5,76	7,29	8,26
	6,25	5,84	4,51	3,88	3,25	3,30	3,72	4,48	5,52	5,86

TABLEAU A.25 – Éclairéments horizontaux mesurés pour la section 2b.

Section 2b										
Éclairéments horizontaux - Simulation										
VRa	9,10	7,60	6,00	4,47	3,57	3,57	4,47	6,00	7,60	9,10
	9,31	7,60	5,82	4,34	3,54	3,54	4,34	5,82	7,60	9,31
	9,60	7,97	6,00	4,49	3,75	3,75	4,49	6,00	7,97	9,60
VLe	8,97	7,69	5,74	4,52	3,88	3,88	4,52	5,74	7,69	8,97
	7,57	6,62	5,25	4,26	3,69	3,69	4,26	5,25	6,62	7,57
	5,79	5,25	4,38	3,62	3,20	3,20	3,62	4,38	5,25	5,79

TABLEAU A.26 – Éclairéments horizontaux simulés pour la section 2b.

	$E_{h_{moyen}}$	U_h	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	7,65 lux	0,43	30 %	19 %
Simulation	5,79 lux	0,55		

TABLEAU A.27 – Comparaison des éclairéments horizontaux obtenus en mesure et en simulation pour la section 2b.

Section 2b										
Luminances au sol - Mesure										
VRa	0,96	0,95	0,92	0,86	0,81	0,77	0,74	0,75	0,87	0,98
	0,81	0,80	0,76	0,69	0,67	0,65	0,65	0,70	0,80	0,88
	0,86	0,85	0,82	0,75	0,70	0,68	0,67	0,71	0,79	0,88
VLe	0,75	0,73	0,67	0,61	0,55	0,52	0,52	0,57	0,65	0,73
	0,55	0,52	0,47	0,43	0,41	0,40	0,41	0,44	0,49	0,53
	0,45	0,42	0,38	0,35	0,33	0,32	0,33	0,36	0,40	0,42

TABLEAU A.28 – Luminances horizontales mesurées pour la section 2b avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 2b										
Luminances au sol - Simulation										
VRa	0,70	0,69	0,69	0,70	0,68	0,67	0,73	0,75	0,73	0,73
	0,71	0,68	0,66	0,67	0,65	0,62	0,68	0,70	0,72	0,73
	0,71	0,67	0,63	0,63	0,61	0,59	0,64	0,67	0,71	0,72
VLe	0,66	0,62	0,56	0,56	0,55	0,53	0,57	0,59	0,65	0,66
	0,54	0,51	0,47	0,47	0,45	0,44	0,48	0,50	0,53	0,54
	0,41	0,40	0,38	0,36	0,34	0,34	0,37	0,39	0,41	0,41

TABLEAU A.29 – Luminances horizontales simulées pour la section 2b avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	L_{moyen}	U_0	U_l	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,64 cd.m ⁻²	0,50	0,73	12 %	13 %
Simulation	0,59 cd.m ⁻²	0,58	0,81		

TABLEAU A.30 – Comparaison des luminances obtenues au sol en mesure et en simulation pour la section 2b.

Section 2b										
Éclairiments verticaux à 12,5 cm du sol - Mesure										
VRa	4,27	7,40	7,85	6,89	5,23	4,29	3,58	2,81	2,27	2,09
	3,96	6,88	7,33	6,52	5,05	4,23	3,42	2,72	2,20	1,94
	3,95	6,00	7,10	6,47	4,99	4,31	3,46	2,72	2,20	2,03
VLe	3,92	5,57	6,00	5,98	4,65	4,15	3,38	2,69	2,13	1,88
	3,00	4,35	4,63	5,01	4,07	3,60	3,05	2,51	2,01	1,78
	2,58	3,61	3,81	4,32	3,36	3,04	2,72	2,22	1,87	1,65

TABLEAU A.31 – Éclairiments verticaux à 12,5 cm du sol mesurés pour la section 2b.

Section 2b										
Éclairiments verticaux à 12,5 cm du sol - Simulation										
VRa	2,40	4,42	5,15	4,48	3,45	2,99	2,40	1,68	1,22	1,04
	2,47	4,45	5,01	4,34	3,38	3,06	2,36	1,67	1,23	1,06
	2,56	4,67	5,15	4,45	3,60	3,25	2,56	1,79	1,32	1,12
VLe	2,44	4,49	4,88	4,44	3,69	3,44	2,68	1,88	1,38	1,13
	2,14	3,87	4,41	4,09	3,48	3,24	2,67	1,89	1,35	1,09
	1,73	3,08	3,63	3,44	2,98	2,84	2,36	1,77	1,30	1,01

TABLEAU A.32 – Éclairiments verticaux à 12,5 cm du sol simulés pour la section 2b.

	E_{vmoyen}	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	3,96 lux	43 %	22 %
Simulation	2,86 lux		

TABLEAU A.33 – Comparaison des éclairiments verticaux à 12,5 cm du sol obtenus en mesure et en simulation pour la section 2b.

Section 2b										
Luminances de cible sans réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	0,25	0,39	0,42	0,39	0,31	0,30	0,33	0,25	0,24	0,17
	0,26	0,37	0,39	0,39	0,32	0,30	0,28	0,22	0,20	0,19
	0,23	0,35	0,37	0,37	0,30	0,28	0,26	0,24	0,18	0,18
VLe	0,22	0,31	0,33	0,32	0,29	0,25	0,23	0,19	0,16	0,15
	0,20	0,26	0,27	0,27	0,23	0,21	0,21	0,18	0,15	0,15
	0,15	0,21	0,22	0,21	0,19	0,19	0,17	0,15	0,15	0,12

TABLEAU A.34 – Luminances de cibles mesurées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2b avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 2b										
Luminances de cible sans réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	0,13	0,26	0,31	0,27	0,21	0,18	0,14	0,09	0,06	0,04
	0,13	0,26	0,30	0,26	0,20	0,18	0,14	0,09	0,06	0,04
	0,13	0,27	0,31	0,27	0,22	0,19	0,15	0,10	0,06	0,04
VLe	0,13	0,26	0,29	0,27	0,22	0,21	0,16	0,10	0,07	0,05
	0,11	0,22	0,26	0,24	0,21	0,19	0,16	0,11	0,07	0,05
	0,09	0,18	0,21	0,21	0,18	0,17	0,14	0,10	0,07	0,05

TABLEAU A.35 – Luminances de cibles simulées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2b avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{cible_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,25 cd.m ⁻²	86 %	89 %
Simulation	0,16 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.36 – Comparaison des luminances de cible obtenues sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 2b.

Section 2b										
Luminances de fond sans réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	0,94	0,92	0,89	0,86	0,80	0,75	0,75	0,74	0,82	0,86
	0,78	0,80	0,81	0,76	0,79	0,82	0,82	0,85	0,85	0,87
	0,78	0,83	0,82	0,77	0,77	0,77	0,78	0,86	0,86	0,74
VLe	0,68	0,70	0,69	0,63	0,60	0,61	0,65	0,68	0,61	0,69
	0,52	0,51	0,50	0,49	0,44	0,46	0,49	0,49	0,52	0,52
	0,42	0,43	0,43	0,41	0,39	0,37	0,37	0,38	0,38	0,39

TABLEAU A.37 – Luminances de fond mesurées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2b avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 2b										
Luminances de fond sans réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	0,72	0,75	0,80	0,76	0,76	0,76	0,74	0,75	0,73	0,75
	0,67	0,68	0,73	0,73	0,71	0,72	0,73	0,72	0,70	0,72
	0,65	0,67	0,69	0,73	0,72	0,70	0,73	0,73	0,69	0,72
VLe	0,59	0,61	0,61	0,67	0,68	0,64	0,68	0,68	0,65	0,65
	0,54	0,51	0,50	0,54	0,55	0,53	0,57	0,57	0,55	0,55
	0,41	0,39	0,38	0,38	0,38	0,41	0,42	0,42	0,41	0,41

TABLEAU A.38 – Luminances de fond simulées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2b avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{fond,moyen}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,67 cd.m ⁻²	11 %	12 %
Simulation	0,63 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.39 – Comparaison des luminances de fond obtenues sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 2b.

Section 2b										
VL sans réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	-32,20	-23,24	-19,26	-18,08	-17,82	-15,37	-13,35	-14,64	-16,45	-18,35
	-24,93	-19,09	-17,31	-14,21	-16,99	-17,53	-17,46	-18,81	-18,21	-17,98
	-25,94	-20,94	-18,53	-15,55	-17,01	-16,84	-16,81	-18,61	-19,34	-14,94
VLe	-22,08	-17,24	-15,00	-12,14	-11,12	-12,04	-13,38	-14,73	-12,84	-14,41
	-15,35	-11,02	-9,38	-8,59	-7,64	-8,30	-8,95	-9,42	-10,41	-9,77
	-12,62	-9,83	-8,76	-7,79	-7,08	-6,07	-6,46	-6,89	-6,54	-7,24

TABLEAU A.40 – Niveaux de visibilité simulés sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2b avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 2b										
VL sans réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	-28,11	-21,87	-20,22	-18,83	-19,92	-19,63	-19,27	-19,89	-18,99	-18,95
	-25,59	-18,58	-17,65	-18,25	-18,57	-18,12	-18,88	-18,98	-18,27	-18,19
	-24,39	-17,81	-15,80	-17,85	-18,49	-17,21	-18,67	-19,01	-17,84	-18,20
VLe	-21,96	-15,64	-13,20	-15,67	-16,71	-14,92	-16,77	-17,49	-16,50	-16,32
	-20,28	-12,66	-9,78	-11,31	-12,39	-11,41	-13,09	-14,09	-13,60	-13,40
	-14,97	-9,63	-6,78	-6,89	-7,45	-8,07	-8,99	-9,74	-9,77	-9,88

TABLEAU A.41 – Niveaux de visibilité mesurés sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2b avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	VL_{moyen}	$ VL > 7$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	-14,65	93,33 %	19 %	20 %
Simulation	-16,19	96,67 %		

TABLEAU A.42 – Comparaison des niveaux de visibilité obtenus sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 2b.

Section 2b										
Luminances de cible avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	0,30	0,44	0,44	0,43	0,33	0,32	0,28	0,26	0,22	0,21
	0,28	0,40	0,42	0,39	0,36	0,29	0,28	0,24	0,24	0,24
	0,30	0,40	0,40	0,39	0,33	0,29	0,26	0,27	0,21	0,20
VLe	0,28	0,35	0,35	0,34	0,27	0,25	0,26	0,23	0,17	0,19
	0,26	0,28	0,29	0,29	0,25	0,23	0,22	0,20	0,19	0,16
	0,17	0,23	0,24	0,23	0,21	0,21	0,19	0,17	0,15	0,16

TABLEAU A.43 – Luminances de cibles mesurées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2b avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 2b										
Luminances de cible avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	0,15	0,28	0,33	0,29	0,22	0,19	0,15	0,11	0,08	0,07
	0,16	0,28	0,32	0,28	0,22	0,19	0,15	0,11	0,08	0,07
	0,16	0,30	0,33	0,28	0,23	0,21	0,16	0,11	0,08	0,07
VLe	0,16	0,29	0,31	0,28	0,23	0,22	0,17	0,12	0,09	0,07
	0,14	0,25	0,28	0,26	0,22	0,21	0,17	0,12	0,09	0,07
	0,11	0,20	0,23	0,22	0,19	0,18	0,15	0,11	0,08	0,06

TABLEAU A.44 – Luminances de cibles simulées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2b avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{cible_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,27 cd.m ⁻²	71 %	60 %
Simulation	0,18 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.45 – Comparaison des luminances de cible obtenues en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 2b.

Section 2b										
Luminances de fond avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	0,94	0,92	0,89	0,86	0,80	0,75	0,75	0,74	0,82	0,86
	0,78	0,80	0,81	0,76	0,79	0,82	0,82	0,85	0,85	0,87
	0,78	0,83	0,82	0,77	0,77	0,77	0,78	0,86	0,86	0,74
VLe	0,68	0,70	0,69	0,63	0,60	0,61	0,65	0,68	0,61	0,69
	0,52	0,51	0,50	0,49	0,44	0,46	0,49	0,49	0,52	0,52
	0,42	0,43	0,43	0,41	0,39	0,37	0,37	0,38	0,38	0,39

TABLEAU A.46 – Luminances de fond mesurées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2b avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 2b										
Luminances de fond avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	0,72	0,75	0,80	0,76	0,76	0,76	0,74	0,75	0,73	0,75
	0,67	0,68	0,72	0,73	0,71	0,71	0,73	0,72	0,70	0,72
	0,65	0,67	0,69	0,73	0,72	0,70	0,73	0,73	0,69	0,72
VLe	0,59	0,61	0,61	0,67	0,68	0,64	0,68	0,68	0,65	0,65
	0,54	0,51	0,50	0,54	0,55	0,53	0,56	0,57	0,55	0,54
	0,40	0,39	0,38	0,38	0,38	0,41	0,42	0,42	0,41	0,41

TABLEAU A.47 – Luminances de fond simulées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2b avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{fond_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,67 cd.m ⁻²	11 %	12 %
Simulation	0,62 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.48 – Comparaison des luminances de fond obtenues en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 2b.

Section 2b										
VL avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	-29,86	-20,93	-18,22	-16,55	-16,96	-14,64	-14,75	-14,27	-16,77	-17,35
	-23,63	-17,70	-15,99	-14,00	-15,79	-17,76	-17,42	-18,24	-17,23	-16,65
	-22,66	-18,81	-17,46	-14,82	-15,73	-16,25	-16,79	-17,80	-18,41	-14,26
VLe	-19,08	-15,52	-13,87	-11,35	-11,62	-12,07	-12,34	-13,28	-12,56	-13,35
	-12,16	-10,15	-8,41	-7,80	-7,16	-7,68	-8,68	-8,98	-9,29	-9,71
	-11,48	-9,00	-7,96	-7,30	-6,54	-5,45	-5,93	-6,24	-6,62	-6,14

TABLEAU A.49 – Niveaux de visibilité mesurés en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2b avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 2b										
VL avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	-26,81	-20,78	-19,36	-18,19	-19,45	-19,23	-18,87	-19,44	-18,47	-18,24
	-24,25	-17,47	-16,80	-17,63	-18,11	-17,72	-18,49	-18,55	-17,74	-17,47
	-22,98	-16,65	-14,93	-17,19	-18,00	-16,78	-18,25	-18,55	-17,27	-17,44
VLe	-20,60	-14,51	-12,35	-15,02	-16,21	-14,47	-16,34	-17,02	-15,93	-15,60
	-19,11	-11,66	-9,00	-10,70	-11,91	-10,97	-12,66	-13,64	-13,10	-12,77
	-14,06	-8,83	-6,12	-6,37	-7,03	-7,68	-8,62	-9,34	-9,33	-9,38

TABLEAU A.50 – Niveaux de visibilité simulés en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 2b avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	VL_{moyen}	$ VL > 7$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	-13,76	90,00 %	21 %	21 %
Simulation	-15,52	96,67 %		

TABLEAU A.51 – Comparaison des niveaux de visibilité obtenus en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 2b.

Section 4										
Éclairéments horizontaux - Mesure										
VRa	17,70	12,96	10,22	7,79	6,90	7,40	8,83	11,81	15,32	17,60
	17,46	12,88	10,75	7,81	6,96	7,36	8,81	11,60	14,56	16,54
	18,02	12,85	11,08	8,18	6,96	7,26	8,60	11,41	13,91	16,30
VLe	17,38	12,81	11,69	8,53	7,17	7,38	8,62	11,13	13,31	15,93
	14,84	12,21	10,97	8,21	7,28	7,32	8,64	10,27	12,06	14,50
	11,55	10,75	9,38	8,55	7,34	7,55	8,45	9,16	10,35	12,05

TABLEAU A.52 – Éclairéments horizontaux mesurés pour la section 4.

Section 4										
Éclairéments horizontaux - Simulation										
VRa	17,69	13,79	10,12	7,85	6,74	7,01	8,55	11,22	15,47	18,16
	17,16	13,62	10,07	7,93	6,63	6,88	8,58	11,18	15,18	17,25
	16,96	13,89	10,33	7,95	6,66	6,94	8,67	11,21	15,34	16,85
VLe	15,73	13,73	10,54	8,16	6,74	7,05	8,97	11,07	15,25	15,63
	13,85	12,91	10,27	8,33	6,91	7,21	9,05	10,46	13,83	13,44
	11,60	11,23	9,51	8,34	7,14	7,42	8,87	9,58	11,86	11,27

TABLEAU A.53 – Éclairéments horizontaux simulés pour la section 4.

	$E_{h_{moyen}}$	U_h	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	11,02 lux	0,63	0 %	6 %
Simulation	11,03 lux	0,60		

TABLEAU A.54 – Comparaison des éclairéments horizontaux obtenus en mesure et en simulation pour la section 4.

Section 4										
Luminances au sol - Mesure										
VRa	0,95	0,93	0,88	0,82	0,79	0,75	0,74	0,80	0,92	0,98
	0,81	0,79	0,73	0,68	0,66	0,65	0,67	0,74	0,82	0,85
	0,86	0,83	0,78	0,72	0,68	0,66	0,68	0,73	0,81	0,85
VLe	0,73	0,69	0,62	0,57	0,53	0,51	0,54	0,60	0,68	0,70
	0,54	0,50	0,45	0,42	0,41	0,41	0,43	0,47	0,52	0,53
	0,44	0,40	0,37	0,34	0,33	0,33	0,35	0,39	0,42	0,42

TABLEAU A.55 – Luminances horizontales mesurées pour la section 4 avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 4										
Luminances au sol - Simulation										
VRa	1,26	1,22	1,17	1,16	1,13	1,13	1,17	1,18	1,24	1,25
	1,24	1,19	1,11	1,09	1,02	1,02	1,09	1,13	1,20	1,21
	1,16	1,10	1,00	0,94	0,88	0,90	0,99	1,03	1,13	1,12
VLe	1,00	0,94	0,86	0,80	0,74	0,77	0,89	0,92	1,04	0,99
	0,81	0,81	0,73	0,69	0,64	0,68	0,77	0,77	0,86	0,80
	0,64	0,66	0,62	0,60	0,56	0,60	0,67	0,64	0,71	0,65

TABLEAU A.56 – Luminances horizontales simulées pour la section 4 avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	L_{moyen}	U_0	U_l	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,64 cd.m ⁻²	0,52	0,76	33 %	6 %
Simulation	0,94 cd.m ⁻²	0,60	0,74		

TABLEAU A.57 – Comparaison des luminances obtenues au sol en mesure et en simulation avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

Section 4										
Éclairissements verticaux à 12,5 cm du sol - Mesure										
VRa	9,87	12,07	12,62	11,41	10,21	9,32	8,36	7,59	6,71	7,02
	9,60	11,50	12,99	11,57	10,20	9,31	8,68	7,96	6,84	6,73
	9,98	12,19	11,73	12,14	10,58	9,50	8,94	8,20	7,07	6,96
VLe	9,82	12,16	14,00	12,68	10,99	9,43	8,83	8,12	6,93	7,01
	8,62	11,74	13,77	10,18	11,26	9,91	8,75	8,01	7,16	7,49
	8,41	10,68	11,30	12,13	10,84	10,10	8,71	7,71	7,02	6,75

TABLEAU A.58 – Éclairissements verticaux à 12,5 cm du sol mesurés avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

Section 4										
Éclairissements verticaux à 12,5 cm du sol - Simulation										
VRa	4,80	8,03	8,32	7,42	6,21	5,30	4,52	3,70	3,10	2,54
	4,69	7,87	8,28	7,53	6,18	5,33	4,70	3,89	3,30	2,70
	4,83	8,05	8,58	7,65	6,28	5,43	4,88	4,13	3,53	2,88
VLe	4,86	8,07	8,88	8,05	6,45	5,56	5,01	4,36	3,73	3,09
	4,73	7,79	8,77	8,43	6,80	5,75	5,13	4,59	3,92	3,25
	4,50	7,00	8,20	8,56	7,22	6,03	5,36	4,80	4,16	3,38

TABLEAU A.59 – Éclairissements verticaux à 12,5 cm du sol simulés avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

	$E_{v_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	9,64 lux	78 %	29 %
Simulation	5,68 lux		

TABLEAU A.60 – Comparaison des éclairissements verticaux à 12,5 cm du sol obtenus en mesure et en simulation avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

Section 4										
Luminances de cible sans réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	0,52	0,59	0,64	0,58	0,53	0,53	0,48	0,50	0,47	0,42
	0,54	0,64	0,70	0,58	0,54	0,53	0,48	0,50	0,46	0,43
	0,58	0,67	0,64	0,59	0,55	0,51	0,49	0,47	0,46	0,39
VLe	0,54	0,64	0,69	0,65	0,54	0,50	0,49	0,44	0,42	0,38
	0,52	0,62	0,66	0,52	0,58	0,53	0,49	0,43	0,37	0,37
	0,42	0,54	0,56	0,57	0,54	0,53	0,45	0,40	0,37	0,33

TABLEAU A.61 – Luminances de cibles mesurées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 4 avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 4										
Luminances de cible sans réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	0,27	0,48	0,50	0,45	0,38	0,32	0,27	0,21	0,17	0,12
	0,26	0,47	0,50	0,46	0,38	0,32	0,28	0,23	0,18	0,13
	0,27	0,48	0,52	0,46	0,38	0,33	0,29	0,24	0,19	0,15
VLe	0,27	0,48	0,54	0,49	0,39	0,34	0,30	0,26	0,21	0,16
	0,27	0,46	0,53	0,51	0,41	0,35	0,31	0,27	0,22	0,17
	0,26	0,42	0,50	0,52	0,44	0,36	0,32	0,28	0,24	0,19

TABLEAU A.62 – Luminances de cibles simulées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 4 avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{cible_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,52 cd.m ⁻²	70 %	50 %
Simulation	0,34 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.63 – Comparaison des luminances de cible obtenues sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 4.

Section 4										
Luminances de fond sans réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	1,05	1,00	1,05	1,05	1,03	1,00	0,97	0,96	0,97	1,01
	0,97	0,97	0,96	0,96	0,98	0,99	1,02	1,00	1,02	1,00
	0,90	0,96	0,93	0,88	0,84	0,88	0,88	0,89	0,87	0,85
VLe	0,79	0,84	0,82	0,75	0,74	0,77	0,78	0,77	0,78	0,77
	0,64	0,51	0,51	0,64	0,65	0,65	0,66	0,66	0,65	0,64
	0,53	0,50	0,50	0,50	0,52	0,50	0,56	0,55	0,55	0,54

TABLEAU A.64 – Luminances de fond mesurées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 4 avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 4										
Luminances de fond sans réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	1,18	1,20	1,21	1,28	1,26	1,21	1,28	1,26	1,22	1,22
	1,15	1,16	1,16	1,24	1,24	1,19	1,23	1,23	1,19	1,18
	1,06	1,07	1,08	1,17	1,16	1,11	1,16	1,16	1,11	1,09
VLe	0,90	0,94	0,95	1,07	1,02	0,96	1,05	1,02	0,98	0,98
	0,77	0,78	0,78	0,85	0,81	0,81	0,86	0,83	0,83	0,81
	0,62	0,64	0,62	0,67	0,68	0,67	0,69	0,67	0,69	0,67

TABLEAU A.65 – Luminances de fond simulées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 4 avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{fond_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,80 cd.m ⁻²	20 %	5 %
Simulation	1,00 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.66 – Comparaison des luminances de fond obtenues sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 4.

Section 4										
VL sans réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	-22,30	-16,36	-14,98	-16,12	-15,95	-14,42	-13,92	-12,44	-12,56	-14,03
	-18,46	-12,84	-9,68	-13,05	-13,99	-13,82	-15,29	-13,49	-14,09	-13,76
	-13,22	-11,32	-10,46	-9,97	-9,44	-11,03	-11,08	-11,27	-10,39	-11,04
VLe	-10,75	-7,84	-4,64	-3,16	-6,32	-8,31	-8,45	-8,90	-9,07	-9,21
	-4,75	4,19	5,38	-4,11	-2,05	-3,89	-4,67	-6,22	-6,91	-6,52
	-4,61	1,40	2,15	2,30	0,50	0,85	-2,95	-3,98	-4,50	-4,98

TABLEAU A.67 – Niveaux de visibilité simulés sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 4 avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 4										
VL sans réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	-29,95	-22,29	-20,39	-22,58	-22,56	-21,53	-23,00	-22,52	-21,37	-21,15
	-29,53	-21,56	-19,28	-21,32	-22,20	-21,08	-21,62	-21,62	-20,61	-20,09
	-25,99	-18,50	-16,27	-19,30	-20,03	-18,98	-19,87	-19,70	-18,68	-18,24
VLe	-20,74	-14,18	-11,88	-15,80	-16,22	-15,21	-17,16	-16,60	-15,77	-15,76
	-16,54	-9,92	-7,29	-9,31	-10,28	-11,31	-12,59	-12,05	-12,46	-12,33
	-12,10	-6,86	-3,71	-4,08	-6,16	-7,42	-8,41	-8,30	-9,22	-9,39

TABLEAU A.68 – Niveaux de visibilité mesurés sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 4 avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	VL_{moyen}	$ VL > 7$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	-8,68	61,67 %	154 %	266 %
Simulation	-16,51	93,33 %		

TABLEAU A.69 – Comparaison des niveaux de visibilité obtenus sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 4.

Section 4										
Luminances de cible avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	0,56	0,60	0,67	0,63	0,56	0,55	0,51	0,55	0,51	0,46
	0,56	0,67	0,72	0,61	0,56	0,55	0,52	0,54	0,50	0,46
	0,61	0,69	0,66	0,62	0,57	0,53	0,51	0,50	0,50	0,44
VLe	0,56	0,66	0,71	0,67	0,56	0,52	0,51	0,47	0,45	0,43
	0,55	0,64	0,69	0,55	0,59	0,53	0,50	0,44	0,41	0,40
	0,44	0,55	0,57	0,59	0,55	0,53	0,46	0,42	0,40	0,37

TABLEAU A.70 – Luminances de cibles mesurées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 4 avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 4										
Luminances de cible avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	0,31	0,51	0,53	0,47	0,40	0,34	0,29	0,24	0,20	0,16
	0,30	0,50	0,53	0,48	0,39	0,34	0,30	0,25	0,21	0,17
	0,31	0,51	0,55	0,49	0,40	0,35	0,31	0,26	0,22	0,18
VLe	0,31	0,51	0,57	0,51	0,41	0,35	0,32	0,28	0,24	0,20
	0,30	0,50	0,56	0,54	0,43	0,37	0,33	0,29	0,25	0,21
	0,29	0,45	0,52	0,54	0,46	0,38	0,34	0,31	0,26	0,22

TABLEAU A.71 – Luminances de cibles simulées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 4 avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{cible_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,54 cd.m ⁻²	62 %	42 %
Simulation	0,36 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.72 – Comparaison des luminances de cible obtenues en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 4.

Section 4										
Luminances de fond avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	1,05	1,00	1,05	1,05	1,03	1,00	0,97	0,96	0,97	1,01
	0,97	0,97	0,96	0,96	0,98	0,99	1,02	1,00	1,02	1,00
	0,90	0,96	0,93	0,88	0,84	0,88	0,88	0,89	0,87	0,85
VLe	0,79	0,84	0,82	0,75	0,74	0,77	0,78	0,77	0,78	0,77
	0,64	0,51	0,51	0,64	0,65	0,65	0,66	0,66	0,65	0,64
	0,53	0,50	0,50	0,50	0,52	0,50	0,56	0,55	0,55	0,54

TABLEAU A.73 – Luminances de fond mesurées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 4 avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 4										
Luminances de fond avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	1,18	1,20	1,21	1,28	1,26	1,21	1,28	1,26	1,22	1,22
	1,15	1,16	1,16	1,24	1,24	1,19	1,23	1,23	1,19	1,18
	1,06	1,07	1,08	1,17	1,16	1,11	1,16	1,16	1,11	1,09
VLe	0,90	0,94	0,95	1,07	1,02	0,96	1,05	1,02	0,98	0,98
	0,77	0,78	0,78	0,85	0,81	0,81	0,86	0,83	0,83	0,81
	0,62	0,64	0,62	0,67	0,68	0,67	0,69	0,67	0,69	0,67

TABLEAU A.74 – Luminances de fond simulées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 4 avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{fond,moyen}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,80 cd.m ⁻²	20 %	5 %
Simulation	1,00 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.75 – Comparaison des luminances de fond obtenues en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 4.

Section 4										
VL avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	-20,30	-15,67	-13,85	-14,71	-15,20	-13,67	-13,28	-11,11	-11,46	-13,00
	-17,23	-11,63	-8,75	-12,07	-13,46	-13,10	-14,10	-12,55	-13,22	-13,03
	-11,85	-10,62	-9,75	-8,96	-8,80	-10,35	-10,55	-10,58	-9,39	-9,92
VLe	-9,66	-7,22	-3,80	-2,78	-5,68	-7,66	-7,78	-8,17	-8,37	-8,11
	-3,71	4,98	6,39	-3,24	-1,81	-3,67	-4,35	-5,88	-5,97	-5,80
	-3,64	1,82	2,61	3,06	0,88	1,02	-2,65	-3,41	-3,73	-4,00

TABLEAU A.76 – Niveaux de visibilité mesurés en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 4 avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

Section 4										
VL avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	-28,68	-21,25	-19,60	-21,96	-22,07	-21,10	-22,58	-22,08	-20,77	-20,40
	-28,29	-20,52	-18,48	-20,69	-21,72	-20,66	-21,19	-21,16	-20,01	-19,37
	-24,73	-17,43	-15,45	-18,66	-19,54	-18,56	-19,43	-19,22	-18,05	-17,52
VLe	-19,53	-13,11	-11,04	-15,13	-15,72	-14,77	-16,70	-16,11	-15,13	-15,06
	-15,46	-8,89	-6,46	-8,62	-9,76	-10,86	-12,12	-11,56	-11,85	-11,71
	-11,15	-5,95	-2,94	-3,40	-5,62	-6,95	-7,93	-7,82	-8,66	-8,85

TABLEAU A.77 – Niveaux de visibilité simulés en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol pour la section 4 avec l’observateur en milieu de voie lente (VLe).

	VL_{moyen}	$ VL > 7$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	-7,88	61,67 %	147 %	203 %
Simulation	-15,83	90,00 %		

TABLEAU A.78 – Comparaison des niveaux de visibilité obtenus en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation pour la section 4.

A.2 Résultats de mesures et de simulations sur le second site expérimental

Pour examiner l'effet d'un changement d'angle d'observation sur les performances d'une installation d'éclairage, une deuxième campagne de mesures a été réalisée sur un second site expérimental. Les mesures expérimentales ont été effectuées la nuit du 1 février 2023 pour un observateur en milieu de voie lente dans quatre géométries d'observation différentes :

- observateur fixe avec $\alpha = 1^\circ$,
- observateur mobile avec $\alpha = 1,43^\circ$,
- observateur mobile avec $\alpha = 3^\circ$,
- observateur mobile avec $\alpha = 5^\circ$.

Nous avons estimé les performances en utilisant les critères classiques et le niveau de visibilité d'une cible standard placée en chaque point de la grille normalisée pour l'observateur fixe, et seulement sur les points de mesure en voie lente pour l'observateur mobile. L'effet du revêtement routier sur la visibilité a également été examiné en annihilant son influence sur la luminance de la cible pour l'observateur fixe. Pour chaque géométrie d'observation, les mesures de luminance ont été effectuées à l'aide d'un appareil de mesure de la luminance par imagerie (ILMD) placé à 60 m devant le maillage normalisé au milieu de la voie lente.

On donne dans cette annexe les tableaux de mesures et de simulation de :

- l'éclairement horizontal (en lux),
- l'éclairement vertical à 12,5 cm du sol (en lux),
- la luminance au sol pour chaque géométrie d'observation (en cd.m^{-2}),
- la luminance de cible sans prise en compte des réflexions de la lumière sur le revêtement pour l'observateur fixe 1° (en cd.m^{-2}),
- la luminance de fond considérée pour le calcul du niveau de visibilité de cible sans prise en compte des réflexions de la lumière sur le revêtement pour l'observateur fixe 1° (en cd.m^{-2}),
- le niveau de visibilité de cible sans prise en compte des réflexions de la lumière sur le revêtement pour l'observateur fixe 1° ,

-
- la luminance de cible avec prise en compte des réflexions de la lumière sur le revêtement pour chaque géométrie d'observation (en cd.m^{-2}),
 - la luminance de fond considérée pour le calcul du niveau de visibilité de cible avec prise en compte des réflexions de la lumière sur le revêtement pour chaque géométrie d'observation (en cd.m^{-2}),
 - le niveau de visibilité de cible avec prise en compte des réflexions de la lumière sur le revêtement pour chaque géométrie d'observation.

On évalue à chaque fois la moyenne et l'écart-type des écarts entre les mesures et les simulations.

		Éclairéments horizontaux - Mesure									
VRa		8,32	7,61	6,78	6,08	5,73	5,83	7,11	7,52	8,48	9,11
		11,34	10,01	8,84	7,37	6,76	7,03	8,47	9,93	11,56	12,36
		16,42	14,97	11,76	9,27	7,69	8,02	9,51	12,74	15,87	16,09
VLe		19,67	17,76	14,31	10,66	8,71	8,55	10,55	14,90	19,20	20,58
		18,71	18,41	14,96	10,82	8,64	8,44	10,93	14,40	18,78	19,31
		16,44	15,78	12,92	9,41	7,59	7,39	8,92	12,66	17,72	18,42

TABLEAU A.79 – Éclairéments horizontaux mesurés.

		Éclairéments horizontaux - Simulation									
VRa		6,04	5,38	4,58	4,09	3,89	3,89	4,09	4,58	5,38	6,04
		9,35	8,49	7,20	6,07	5,46	5,46	6,07	7,20	8,49	9,35
		12,05	11,23	9,33	7,51	6,46	6,46	7,51	9,33	11,23	12,05
VLe		15,91	14,74	11,55	8,59	7,05	7,05	8,59	11,55	14,74	15,91
		15,99	15,74	12,33	9,00	7,22	7,22	9,00	12,33	15,74	15,99
		14,69	14,56	11,06	8,11	6,66	6,66	8,11	11,06	14,56	14,69

TABLEAU A.80 – Éclairéments horizontaux simulés.

		Grille entière			
		$E_{h_{moyen}}$	U_h	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure		11,74 lux	0,49	28 %	14 %
Simulation		9,34 lux	0,42		
		Voie lente uniquement			
		$E_{h_{moyen}}$	U_h	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure		13,85 lux	0,53	20 %	6 %
Simulation		11,55 lux	0,58		

TABLEAU A.81 – Comparaison des éclairéments horizontaux obtenus en mesure et en simulation sur la grille de mesure entière et sur la voie lente uniquement.

Éclairiments verticaux à 12,5 cm du sol - Mesure										
VRa	2,92	4,77	5,20	5,23	5,13	4,66	4,48	4,20	3,63	3,49
	4,48	6,30	7,27	7,08	6,58	5,54	4,96	4,57	3,97	3,60
	5,07	8,34	9,87	9,54	7,98	6,51	5,46	4,94	4,40	3,98
VLe	5,69	10,22	12,18	11,07	8,73	7,12	5,82	5,11	4,52	4,05
	5,44	10,27	12,73	11,40	8,92	7,07	5,76	5,02	4,34	3,78
	4,70	9,03	11,02	10,02	8,03	6,46	5,31	4,74	3,92	3,59

TABLEAU A.82 – Éclairiments verticaux à 12,5 cm du sol mesurés.

Éclairiments verticaux à 12,5 cm du sol - Simulation										
VRa	2,70	3,43	3,55	3,52	3,57	3,54	3,52	3,31	3,00	2,43
	3,50	5,18	5,80	5,64	5,19	4,73	4,32	3,90	3,29	2,67
	4,04	6,71	7,70	7,28	6,29	5,42	4,76	4,20	3,53	2,79
VLe	4,80	8,68	9,71	8,52	6,94	5,79	4,99	4,29	3,55	2,82
	4,76	9,27	10,47	9,05	7,18	5,85	5,00	4,24	3,45	2,71
	4,38	8,60	9,41	8,21	6,64	5,40	4,51	3,79	3,12	2,48

TABLEAU A.83 – Éclairiments verticaux à 12,5 cm du sol simulés.

Grille entière			
	$E_{v_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	6,34 lux	25 %	10 %
Simulation	5,14 lux		
Voie lente uniquement			
	$E_{v_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	7,20 lux	22 %	9 %
Simulation	5,95 lux		

TABLEAU A.84 – Comparaison des éclairiments verticaux à 12,5 cm du sol obtenus en mesure et en simulation sur la grille de mesure entière et sur la voie lente uniquement.

Observateur fixe 1°										
Luminances au sol - Mesure										
VRa	0,40	0,39	0,40	0,43	0,41	0,60	0,59	0,53	0,48	0,45
	0,50	0,50	0,54	0,59	0,64	0,66	0,64	0,64	0,62	0,59
	0,80	0,75	0,71	0,72	0,80	0,90	0,88	0,92	1,00	0,91
VLe	1,26	1,16	1,06	1,15	1,25	1,27	1,23	1,29	1,44	1,35
	1,19	1,27	1,44	1,45	1,57	1,48	1,31	1,30	1,37	1,37
	1,01	0,95	0,79	0,73	0,78	0,85	0,97	0,92	0,82	0,80

TABLEAU A.85 – Luminances horizontales mesurées avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur fixe 1°										
Luminances au sol - Simulation										
VRa	0,53	0,50	0,46	0,43	0,42	0,42	0,43	0,45	0,48	0,52
	0,78	0,76	0,72	0,66	0,61	0,62	0,64	0,69	0,73	0,77
	1,01	1,02	0,96	0,86	0,78	0,78	0,84	0,91	0,96	0,99
VLe	1,33	1,35	1,23	1,06	0,95	0,96	1,06	1,18	1,29	1,30
	1,40	1,48	1,38	1,19	1,07	1,07	1,21	1,33	1,42	1,34
	1,27	1,36	1,25	1,10	1,01	1,02	1,12	1,23	1,33	1,22

TABLEAU A.86 – Luminances horizontales simulées avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Grille entière					
	L_{moyen}	U_0	U_l	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,90 cd.m ⁻²	0,44	0,76	17 %	21 %
Simulation	0,95 cd.m ⁻²	0,44	0,72		
Voie lente uniquement					
	L_{moyen}	U_0	U_l	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	1,16 cd.m ⁻²	0,63	0,76	19 %	23 %
Simulation	1,22 cd.m ⁻²	0,78	0,72		

TABLEAU A.87 – Comparaison des luminances obtenues au sol en mesure et en simulation avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur fixe 1°										
Luminances de cible sans réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	0,21	0,26	0,30	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,24	0,24
	0,28	0,35	0,38	0,39	0,36	0,33	0,31	0,31	0,28	0,29
	0,33	0,48	0,52	0,50	0,43	0,39	0,38	0,34	0,31	0,37
VLe	0,32	0,57	0,62	0,60	0,53	0,47	0,42	0,37	0,40	0,42
	0,30	0,58	0,65	0,62	0,57	0,47	0,44	0,40	0,42	0,34
	0,27	0,51	0,56	0,53	0,44	0,37	0,35	0,35	0,28	0,31

TABLEAU A.88 – Luminances de cibles mesurées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur fixe 1°										
Luminances de cible sans réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	0,17	0,22	0,23	0,22	0,23	0,23	0,22	0,21	0,19	0,15
	0,22	0,33	0,37	0,36	0,33	0,30	0,28	0,25	0,21	0,17
	0,26	0,43	0,49	0,46	0,40	0,34	0,30	0,27	0,22	0,18
VLe	0,31	0,55	0,62	0,54	0,44	0,37	0,32	0,27	0,23	0,18
	0,30	0,59	0,67	0,58	0,46	0,37	0,32	0,27	0,22	0,17
	0,28	0,55	0,60	0,52	0,42	0,34	0,29	0,24	0,20	0,16

TABLEAU A.89 – Luminances de cibles simulées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Grille entière			
	$L_{cible_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,39 cd.m ⁻²	28 %	30 %
Simulation	0,33 cd.m ⁻²		
Voie lente uniquement			
	$L_{cible_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,45 cd.m ⁻²	31 %	37 %
Simulation	0,38 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.90 – Comparaison des luminances de cible obtenues sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur fixe 1°										
Luminances de fond sans réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	0,42	0,46	0,43	0,46	0,46	0,48	0,46	0,47	0,51	0,53
	0,63	0,67	0,66	0,64	0,69	0,63	0,64	0,67	0,66	0,67
	0,92	0,99	0,94	0,95	0,90	0,89	0,92	0,94	0,95	1,02
VLe	1,30	1,31	1,29	1,28	1,35	1,40	1,40	1,37	1,37	1,37
	1,33	1,40	1,44	1,49	1,46	1,45	1,43	1,49	1,48	1,47
	1,12	1,11	1,13	1,15	1,18	1,19	1,18	1,21	1,15	1,17

TABLEAU A.91 – Luminances de fond mesurées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur fixe 1°										
Luminances de fond sans réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	0,53	0,52	0,48	0,44	0,44	0,43	0,46	0,49	0,48	0,51
	0,78	0,77	0,74	0,69	0,63	0,67	0,71	0,76	0,75	0,76
	1,00	1,02	0,99	0,88	0,91	0,93	0,97	0,99	1,02	0,99
VLe	1,25	1,35	1,27	1,23	1,25	1,29	1,32	1,33	1,38	1,30
	1,39	1,45	1,42	1,40	1,35	1,48	1,39	1,36	1,47	1,43
	1,27	1,34	1,29	1,27	1,20	1,33	1,29	1,22	1,36	1,30

TABLEAU A.92 – Luminances de fond simulées sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Grille entière			
	$L_{fond_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	1,00 cd.m ⁻²	7 %	8 %
Simulation	1,03 cd.m ⁻²		
Voie lente uniquement			
	$L_{fond_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	1,31 cd.m ⁻²	6 %	8 %
Simulation	1,33 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.93 – Comparaison des luminances de fond obtenues sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur fixe 1°										
VL sans réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	-8,00	-6,75	-4,37	-5,09	-5,28	-5,39	-4,94	-5,36	-6,15	-6,53
	-13,02	-10,97	-8,91	-7,84	-9,52	-8,36	-8,59	-9,01	-8,87	-8,45
	-21,95	-17,82	-14,03	-13,88	-13,59	-13,59	-14,00	-14,70	-15,03	-14,32
VLe	-36,73	-25,86	-21,80	-21,11	-23,78	-25,48	-25,51	-24,41	-22,40	-20,77
	-38,32	-28,79	-25,89	-26,81	-25,93	-27,00	-25,57	-26,73	-24,68	-24,93
	-31,71	-20,83	-18,79	-19,27	-21,28	-22,52	-21,59	-21,06	-19,98	-18,99

TABLEAU A.94 – Niveaux de visibilité mesurés sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur fixe 1°										
VL sans réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	-11,50	-9,11	-7,20	-5,88	-5,31	-4,77	-5,39	-5,97	-5,85	-6,90
	-18,02	-13,40	-10,60	-8,86	-7,64	-8,78	-9,91	-10,89	-11,03	-11,31
	-23,80	-17,90	-14,15	-11,11	-12,87	-13,89	-15,05	-15,51	-16,21	-15,60
VLe	-30,25	-24,04	-18,68	-18,56	-20,50	-22,03	-22,67	-22,55	-23,39	-21,65
	-35,07	-26,12	-21,57	-22,08	-22,55	-26,42	-24,17	-23,36	-25,45	-24,15
	-31,75	-23,93	-19,65	-20,04	-19,67	-23,55	-22,55	-20,88	-23,55	-22,07

TABLEAU A.95 – Niveaux de visibilité simulés sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Grille entière				
	VL_{moyen}	$ VL > 7$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	-17,38	85,00 %	12 %	14 %
Simulation	-17,29	88,33 %		
Voie lente uniquement				
	VL_{moyen}	$ VL > 7$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	-8,42	76,67 %	10 %	11 %
Simulation	-24,62	100,00 %		

TABLEAU A.96 – Comparaison des niveaux de visibilité obtenus sans tenir compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur fixe 1°										
Luminances de cible avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	0,22	0,27	0,30	0,30	0,29	0,29	0,29	0,28	0,26	0,27
	0,27	0,38	0,41	0,40	0,39	0,34	0,33	0,34	0,30	0,30
	0,35	0,50	0,55	0,53	0,46	0,43	0,40	0,37	0,34	0,41
VLe	0,37	0,61	0,69	0,65	0,56	0,52	0,45	0,41	0,44	0,46
	0,36	0,66	0,71	0,65	0,60	0,52	0,48	0,43	0,48	0,38
	0,35	0,56	0,62	0,55	0,47	0,40	0,38	0,39	0,30	0,35

TABLEAU A.97 – Luminances de cibles mesurées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur fixe 1°										
Luminances de cible avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	0,19	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23	0,21	0,18
	0,26	0,36	0,39	0,38	0,35	0,32	0,29	0,27	0,23	0,20
	0,30	0,47	0,52	0,49	0,42	0,36	0,32	0,29	0,26	0,22
VLe	0,36	0,60	0,66	0,57	0,47	0,39	0,34	0,30	0,27	0,23
	0,36	0,64	0,71	0,61	0,48	0,39	0,34	0,30	0,26	0,23
	0,33	0,60	0,64	0,55	0,44	0,36	0,31	0,27	0,24	0,21

TABLEAU A.98 – Luminances de cibles simulées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Grille entière			
	$L_{cible_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,42 cd.m ⁻²	24 %	23 %
Simulation	0,36 cd.m ⁻²		
Voie lente uniquement			
	$L_{cible_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,49 cd.m ⁻²	27 %	28 %
Simulation	0,42 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.99 – Comparaison des luminances de cible obtenues en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur fixe 1°										
Luminances de fond avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	0,42	0,46	0,43	0,46	0,46	0,48	0,46	0,47	0,51	0,53
	0,63	0,67	0,66	0,64	0,69	0,63	0,64	0,67	0,66	0,67
	0,92	0,99	0,94	0,95	0,90	0,89	0,92	0,94	0,95	1,02
VLe	1,30	1,31	1,29	1,28	1,35	1,40	1,40	1,37	1,37	1,37
	1,33	1,40	1,44	1,49	1,46	1,45	1,43	1,49	1,48	1,47
	1,12	1,11	1,13	1,15	1,18	1,19	1,18	1,21	1,15	1,17

TABLEAU A.100 – Luminances de fond mesurées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur fixe 1°										
Luminances de fond avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	0,53	0,52	0,48	0,44	0,44	0,43	0,46	0,49	0,48	0,51
	0,78	0,77	0,74	0,69	0,63	0,67	0,71	0,76	0,75	0,76
	1,00	1,02	0,99	0,88	0,91	0,93	0,97	0,99	1,02	0,99
VLe	1,25	1,35	1,27	1,23	1,25	1,29	1,32	1,33	1,38	1,30
	1,39	1,45	1,42	1,40	1,35	1,48	1,39	1,36	1,47	1,43
	1,27	1,34	1,29	1,27	1,20	1,33	1,29	1,22	1,36	1,30

TABLEAU A.101 – Luminances de fond simulées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Grille entière			
	$L_{fond_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	1,00 cd.m ⁻²	7 %	8 %
Simulation	1,03 cd.m ⁻²		
Voie lente uniquement			
	$L_{fond_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	1,31 cd.m ⁻²	6 %	8 %
Simulation	1,33 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.102 – Comparaison des luminances de fond obtenues en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur fixe 1°										
VL avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	-7,55	-6,44	-4,20	-4,85	-4,92	-5,04	-4,51	-4,80	-5,68	-5,89
	-13,22	-9,98	-8,08	-7,31	-8,68	-7,89	-8,24	-8,29	-8,25	-8,05
	-20,96	-17,14	-12,90	-13,16	-12,85	-12,50	-13,27	-14,01	-14,18	-13,33
VLe	-34,82	-24,36	-19,59	-19,57	-22,92	-24,23	-24,57	-23,59	-21,52	-19,95
	-35,97	-25,95	-23,87	-25,83	-25,07	-25,60	-24,53	-25,89	-23,33	-23,96
	-28,71	-19,05	-16,78	-18,65	-20,56	-21,75	-20,85	-20,09	-19,51	-18,09

TABLEAU A.103 – Niveaux de visibilité mesurés en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur fixe 1°										
VL avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	-10,82	-8,55	-6,74	-5,51	-4,98	-4,47	-5,09	-5,66	-5,50	-6,49
	-16,98	-12,51	-9,89	-8,30	-7,18	-8,38	-9,50	-10,45	-10,52	-10,70
	-22,46	-16,73	-13,22	-10,41	-12,32	-13,41	-14,58	-14,97	-15,54	-14,82
VLe	-28,51	-22,51	-17,52	-17,75	-19,91	-21,53	-22,14	-21,93	-22,59	-20,64
	-33,32	-24,49	-20,34	-21,23	-21,94	-25,91	-23,63	-22,72	-24,61	-23,13
	-30,15	-22,43	-18,54	-19,27	-19,11	-23,08	-22,05	-20,30	-22,76	-21,12

TABLEAU A.104 – Niveaux de visibilité simulés en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Grille entière				
	VL_{moyen}	$ VL > 7$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	-16,42	85,00 %	12 %	14 %
Simulation	-23,31	100,00 %		
Voie lente uniquement				
	VL_{moyen}	$ VL > 7$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	-17,11	98,33 %	9 %	11 %
Simulation	-22,51	100,00 %		

TABLEAU A.105 – Comparaison des niveaux de visibilité obtenus en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation avec l’observateur fixe 1° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 1,43°										
Luminances au sol - Mesure										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	1,26	1,21	1,21	1,12	1,03	1,18	1,18	1,19	1,10	1,15
	1,15	1,21	1,12	1,32	1,27	1,34	1,40	1,33	1,18	1,04
	0,83	0,94	0,83	0,69	0,67	0,80	0,85	0,88	0,91	0,79

TABLEAU A.106 – Luminances horizontales mesurées avec l’observateur mobile 1,43° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 1,43°										
Luminances au sol - Simulation										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	1,33	1,35	1,22	1,05	0,95	0,95	1,06	1,17	1,28	1,29
	1,40	1,48	1,38	1,19	1,07	1,07	1,21	1,33	1,42	1,34
	1,27	1,36	1,25	1,10	1,01	1,02	1,12	1,23	1,33	1,22

TABLEAU A.107 – Luminances horizontales simulées avec l’observateur mobile 1,43° en milieu de voie lente (VLe).

	L_{moyen}	U_0	U_t	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	1,07 cd.m ⁻²	0,62	0,74	19 %	19 %
Simulation	1,22 cd.m ⁻²	0,78	0,72		

TABLEAU A.108 – Comparaison des luminances obtenues au sol en mesure et en simulation avec l’observateur mobile 1,43° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 1,43°										
Luminances de cible avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	0,46	0,65	0,70	0,66	0,58	0,48	0,44	0,38	0,32	0,38
	0,44	0,63	0,80	0,68	0,61	0,52	0,42	0,38	0,35	0,30
	0,39	0,56	0,64	0,58	0,48	0,40	0,36	0,32	0,31	0,30

TABLEAU A.109 – Luminances de cibles mesurées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 1,43° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 1,43°										
Luminances de cible avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	0,36	0,60	0,66	0,57	0,47	0,39	0,34	0,30	0,27	0,23
	0,36	0,64	0,71	0,61	0,48	0,39	0,34	0,30	0,26	0,23
	0,33	0,60	0,64	0,55	0,44	0,36	0,31	0,27	0,24	0,21

TABLEAU A.110 – Luminances de cibles simulées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 1,43° en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{cible_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,48 cd.m ⁻²	21 %	14 %
Simulation	0,42 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.111 – Comparaison des luminances de cible obtenues en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation avec l’observateur mobile 1,43° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 1,43°										
Luminances de fond avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	0,68	0,70	0,69	0,63	0,60	0,61	0,65	0,68	0,61	0,69
	0,52	0,51	0,50	0,49	0,44	0,46	0,49	0,49	0,52	0,52
	0,42	0,43	0,43	0,41	0,39	0,37	0,37	0,38	0,38	0,39

TABLEAU A.112 – Luminances de fond mesurées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 1,43° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 1,43°										
Luminances de fond avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	1,25	1,07	1,26	1,18	1,23	1,25	1,29	1,30	1,34	1,37
	1,40	1,21	1,41	1,40	1,37	1,34	1,46	1,46	1,39	1,48
	1,27	1,12	1,28	1,28	1,25	1,22	1,34	1,28	1,26	1,37

TABLEAU A.113 – Luminances de fond simulées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 1,43° en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{fond_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,67 cd.m ⁻²	10 %	12 %
Simulation	1,31 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.114 – Comparaison des luminances de fond obtenues en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation avec l’observateur mobile 1,43° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 1,43°										
VL avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	-28,73	-22,86	-20,50	-22,42	-26,06	-29,87	-30,72	-31,86	-32,92	-29,50
	-34,18	-27,81	-22,94	-30,18	-31,08	-32,37	-32,79	-35,67	-36,03	-37,42
	-27,73	-16,66	-13,78	-16,37	-21,68	-24,62	-26,46	-24,87	-23,81	-24,06

TABLEAU A.115 – Niveaux de visibilité mesurés en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 1,43° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 1,43°										
VL avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	-29,85	-15,70	-20,04	-20,40	-25,66	-28,62	-31,66	-33,37	-35,80	-37,88
	-34,86	-18,94	-23,49	-26,55	-29,76	-31,51	-37,26	-38,74	-37,78	-41,98
	-31,57	-17,41	-21,33	-24,46	-26,79	-28,62	-34,34	-33,83	-34,13	-38,63

TABLEAU A.116 – Niveaux de visibilité simulés en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 1,43° en milieu de voie lente (VLe).

	VL_{moyen}	$ VL > 7$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	-27,20	100,00 %	15 %	20 %
Simulation	-29,70	100,00 %		

TABLEAU A.117 – Comparaison des niveaux de visibilité obtenus en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation avec l’observateur mobile 1,43° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 3°										
Luminances au sol - Mesure										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	1,05	0,97	1,00	0,86	0,82	1,02	0,95	0,90	0,90	0,95
	0,94	0,96	0,88	1,09	1,01	1,15	1,08	0,83	0,88	0,82
	0,67	0,70	0,66	0,56	0,51	0,68	0,67	0,70	0,83	0,66

TABLEAU A.118 – Luminances horizontales mesurées avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 3°										
Luminances au sol - Simulation										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	1,07	1,07	0,97	0,84	0,75	0,75	0,84	0,94	1,02	1,04
	1,14	1,22	1,10	0,95	0,87	0,88	0,98	1,07	1,15	1,10
	1,04	1,13	1,02	0,90	0,82	0,83	0,90	0,99	1,08	1,01

TABLEAU A.119 – Luminances horizontales simulées avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

	L_{moyen}	U_0	U_t	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,86 cd.m ⁻²	0,60	0,72	21 %	21 %
Simulation	0,98 cd.m ⁻²	0,76	0,71		

TABLEAU A.120 – Comparaison des luminances obtenues au sol en mesure et en simulation avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 3°										
Luminances de cible avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	0,32	0,56	0,64	0,60	0,47	0,40	0,33	0,30	0,27	0,26
	0,32	0,56	0,66	0,61	0,48	0,41	0,33	0,29	0,25	0,23
	0,28	0,51	0,58	0,54	0,42	0,36	0,29	0,26	0,23	0,22

TABLEAU A.121 – Luminances de cibles mesurées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 3°										
Luminances de cible avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	0,36	0,60	0,66	0,57	0,47	0,39	0,34	0,30	0,27	0,23
	0,36	0,64	0,71	0,61	0,48	0,39	0,34	0,30	0,26	0,23
	0,33	0,60	0,64	0,55	0,44	0,36	0,31	0,27	0,24	0,21

TABLEAU A.122 – Luminances de cibles simulées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{cible_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,40 cd.m ⁻²	5 %	6 %
Simulation	0,42 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.123 – Comparaison des luminances de cible obtenues en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 3°										
Luminances de fond avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	1,10	1,03	1,06	1,04	1,14	1,00	1,10	1,19	1,19	1,14
	1,26	1,28	1,34	1,30	1,29	1,27	1,18	1,11	1,09	1,05
	0,79	0,77	0,78	0,75	0,84	0,88	0,95	0,92	0,87	0,92

TABLEAU A.124 – Luminances de fond mesurées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 3°										
Luminances de fond avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	1,09	0,99	0,85	0,75	0,82	0,91	0,98	1,03	1,05	1,07
	1,22	1,12	0,97	0,88	0,99	1,08	1,15	1,15	1,14	1,22
	1,13	1,04	0,91	0,82	0,87	0,98	1,06	1,08	1,03	1,11

TABLEAU A.125 – Luminances de fond simulées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{fond_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	1,05 cd.m ⁻²	16 %	20 %
Simulation	1,02 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.126 – Comparaison des luminances de fond obtenues en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 3°										
VL avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	-66,59	-40,95	-36,16	-37,44	-57,86	-51,75	-65,91	-76,31	-78,66	-74,99
	-80,45	-61,67	-57,82	-58,75	-70,04	-73,70	-73,30	-70,16	-71,84	-70,36
	-44,07	-22,42	-17,36	-17,86	-36,04	-44,54	-55,94	-56,72	-54,93	-59,27

TABLEAU A.127 – Niveaux de visibilité mesurés en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 3°										
VL avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	-61,02	-32,38	-16,32	-15,11	-29,44	-43,13	-52,87	-60,49	-64,98	-69,84
	-72,18	-39,88	-21,42	-23,01	-42,33	-57,52	-67,09	-70,77	-73,54	-82,92
	-66,83	-36,80	-22,44	-22,42	-35,72	-50,98	-62,84	-67,95	-66,29	-75,28

TABLEAU A.128 – Niveaux de visibilité simulés en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

	VL_{moyen}	$ VL > 7$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	-56,13	100,00 %	40 %	57 %
Simulation	-50,13	100,00 %		

TABLEAU A.129 – Comparaison des niveaux de visibilité obtenus en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation avec l’observateur mobile 3° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 5°										
Luminances au sol - Mesure										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	0,89	0,86	0,77	0,67	0,66	0,62	0,66	0,74	0,70	0,76
	0,81	0,89	0,76	0,80	0,65	0,76	0,74	0,65	0,71	0,71
	0,65	0,67	0,60	0,47	0,45	0,50	0,58	0,65	0,71	0,67

TABLEAU A.130 – Luminances horizontales mesurées avec l’observateur mobile 5° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 5°										
Luminances au sol - Simulation										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	0,97	0,99	0,89	0,76	0,67	0,66	0,73	0,84	0,93	0,95
	1,09	1,08	1,00	0,86	0,77	0,77	0,87	0,97	1,05	1,07
	1,05	1,00	0,90	0,78	0,73	0,73	0,80	0,89	0,98	1,00

TABLEAU A.131 – Luminances horizontales simulées avec l’observateur mobile 5° en milieu de voie lente (VLe).

	L_{moyen}	U_0	U_l	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,69 cd.m ⁻²	0,65	0,73	22 %	11 %
Simulation	0,89 cd.m ⁻²	0,74	0,71		

TABLEAU A.132 – Comparaison des luminances obtenues au sol en mesure et en simulation avec l’observateur mobile 5° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 5°										
Luminances de cible avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	0,32	0,56	0,62	0,55	0,44	0,36	0,30	0,27	0,26	0,26
	0,29	0,57	0,64	0,57	0,46	0,37	0,31	0,27	0,25	0,25
	0,28	0,51	0,57	0,50	0,41	0,33	0,28	0,25	0,22	0,23

TABLEAU A.133 – Luminances de cibles mesurées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 5° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 5°										
Luminances de cible avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	0,36	0,60	0,66	0,57	0,47	0,39	0,34	0,30	0,27	0,23
	0,36	0,64	0,71	0,61	0,48	0,39	0,34	0,30	0,26	0,23
	0,33	0,60	0,64	0,55	0,44	0,36	0,31	0,27	0,24	0,21

TABLEAU A.134 – Luminances de cibles simulées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 5° en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{cible_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,38 cd.m ⁻²	9 %	7 %
Simulation	0,42 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.135 – Comparaison des luminances de cible obtenues en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation avec l’observateur mobile 5° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 5°										
Luminances de fond avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	0,99	0,94	0,86	0,74	0,86	0,84	0,85	0,91	0,97	1,04
	0,94	1,08	0,98	1,05	1,08	1,01	0,96	0,88	0,88	0,98
	0,73	0,72	0,63	0,64	0,51	0,77	0,87	0,89	0,89	0,81

TABLEAU A.136 – Luminances de fond mesurées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 5° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 5°										
Luminances de fond avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	1,01	0,96	0,83	0,71	0,67	0,73	0,82	0,89	0,15	0,96
	1,11	1,06	0,92	0,80	0,78	0,89	1,00	1,05	0,14	1,13
	1,05	0,97	0,84	0,74	0,73	0,79	0,89	0,96	0,13	1,09

TABLEAU A.137 – Luminances de fond simulées en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 5° en milieu de voie lente (VLe).

	$L_{fond_{moyen}}$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	0,88 cd.m ⁻²	69 %	173 %
Simulation	0,83 cd.m ⁻²		

TABLEAU A.138 – Comparaison des luminances de fond obtenues en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation avec l’observateur mobile 5° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 5°										
VL avec réflexion sur le sol - Mesure										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	-86,63	-49,09	-30,57	-24,56	-52,80	-62,33	-70,78	-81,24	-92,28	-99,53
	-83,28	-65,24	-43,92	-61,85	-80,27	-82,57	-84,45	-78,12	-81,64	-94,00
	-57,12	-27,30	-7,37	-18,02	-13,37	-57,07	-76,15	-82,49	-86,00	-74,77

TABLEAU A.139 – Niveaux de visibilité mesurés en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 5° en milieu de voie lente (VLe).

Observateur mobile 5°										
VL avec réflexion sur le sol - Simulation										
VRa	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
VLe	-73,49	-40,29	-18,99	-15,18	-23,26	-38,74	-54,81	-67,09	13,48	-82,08
	-85,30	-47,42	-23,38	-22,08	-34,14	-56,07	-74,64	-85,11	13,53	-102,3
	-81,83	-42,12	-22,35	-21,85	-32,82	-47,80	-66,15	-78,74	12,41	-100,2

TABLEAU A.140 – Niveaux de visibilité simulés en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol avec l’observateur mobile 5° en milieu de voie lente (VLe).

	VL_{moyen}	$ VL > 7$	Moyenne des écarts	Écart-type des écarts
Mesure	-63,49	100,00 %	117 %	246 %
Simulation	-43,63	100,00 %		

TABLEAU A.141 – Comparaison des niveaux de visibilité obtenus en tenant compte des réflexions de la lumière sur le sol en mesure et en simulation avec l’observateur mobile 5° en milieu de voie lente (VLe).

A.3 Consignes pour l'expérimentation avec sujets

Au début de l'expérimentation en RV, chaque sujet a reçu les consignes suivantes :

« Dans cette expérimentation, tu vas avoir quatre rôles différents : celui d'un piéton, celui d'un cycliste et celui d'une automobiliste à faible vitesse et sur voie rapide. Pour chacune de ces conditions, tu devras suivre les consignes d'une monitrice et te concentrer sur ton trajet, donc la route ou le trottoir, de la même façon qu'en situation réelle. Tu devras également signaler la présence d'un obstacle, représenté par une demie sphère rouge, dès que tu le vois.

Pour cela, tu vas avoir une manette dans les mains. Pour avancer, il te suffit d'appuyer sur la gachette droite. Pour reculer, c'est la gachette gauche. Pour tourner, tu dois utiliser le joystick gauche. Et enfin, pour signaler que tu as vu la sphère rouge, tu appuies sur le bouton Y, celui du haut. Avant de commencer, nous allons juste devoir calibrer le casque donc je te propose de le mettre sur ta tête.

Phase de calibration de l'eye-tracker...

On va pouvoir commencer. Ce que je te propose, c'est de faire l'expérimentation pour deux conditions puis de faire une pause et de faire ensuite les deux conditions restantes afin que tu n'aies pas le mal des simulateurs. Bien sûr, si tu ne te sens pas bien, à tout moment, tu me dis et on fait une pause ou on arrête. On pourra également faire une pause entre chaque condition. Avant cela, je vais simplement te lancer une scène tutorielle pour que tu te fasses à la RV et aux sensations qu'elle peut engendrer. »

Début de l'expérimentation.

A.4 Mesures colorimétriques de revêtements

Comme évoqué dans la Section 5.1, le groupe de travail « Revêtements et Lumière » a élaboré une bibliothèque de 30 chaussées urbaines actuelles et innovantes. La couleur de chaque revêtement a été évaluée à l'aide de trois appareils de mesure à leur état initial (T0) puis après avoir été installés à l'extérieur pendant 30 mois afin de subir un vieillissement naturel (T30).

Les coordonnées colorimétriques mesurées pour chaque échantillon à T0 avec chacun des appareils sont données dans le Tableau A.142 ainsi que les coordonnées colorimétriques moyennes. De même, on donne les coordonnées colorimétriques mesurées à T30 dans le Tableau A.143.

La différence de couleur entre les échantillons de revêtement à T0 et à T30 est calculée et résumée dans le Tableau A.144. Pour chaque famille de chaussée, on a mis en évidence le revêtement amenant à la différence de couleur minimale en vert et celui ayant la différence de couleur maximale en rouge. Aussi, une description de la formulation des revêtements et de leurs potentiels traitements de surface est explicitée dans ce tableau.

Famille	N°	CM			CR1			CR2			Moyenne des 3		
		L_{moy}^*	a_{moy}^*	b_{moy}^*	L_{moy}^*	a_{moy}^*	b_{moy}^*	L_{moy}^*	a_{moy}^*	b_{moy}^*	L_{moy}^*	a_{moy}^*	b_{moy}^*
Béton bitumineux	1	21,13	0,31	1,01	24,60	0,95	-0,35	30,21	0,84	1,36	25,31	0,70	0,67
	2	22,50	0,52	0,44	24,78	1,13	-0,50	31,14	1,01	1,58	26,14	0,89	0,51
	3	53,75	1,33	8,70	52,21	1,07	6,90	45,06	1,10	5,40	50,34	1,17	7,00
	4	31,01	6,82	12,92	32,28	5,67	9,67	31,58	5,89	9,82	31,62	6,12	10,80
	5	29,41	7,05	13,58	31,41	5,76	9,99	35,34	5,75	12,30	32,06	6,19	11,96
	6	49,36	5,80	22,23	49,89	4,62	18,68	49,47	5,10	19,60	49,57	5,17	20,17
	7	49,13	5,73	23,73	51,03	4,55	20,44	50,36	5,05	21,12	50,17	5,11	21,76
Béton de ciment	1	73,01	-0,01	4,75	69,97	-0,09	4,05	69,34	-0,05	4,61	70,77	-0,05	4,47
	2	75,23	0,21	5,33	72,67	0,08	4,52	72,00	0,13	5,09	73,30	0,14	4,98
	3	53,86	1,35	7,40	54,76	1,01	6,71	53,87	1,20	7,02	54,16	1,19	7,04
	4	64,52	2,50	10,74	64,80	2,26	10,22	64,08	2,50	10,76	64,46	2,42	10,57
	5	68,61	0,95	7,81	66,13	0,55	7,27	65,49	0,70	7,74	66,74	0,73	7,61
	6	79,43	0,99	7,78	77,07	0,65	7,09	76,25	0,76	7,74	77,58	0,80	7,54
	7	69,15	1,39	8,78	66,65	1,10	7,60	66,02	1,16	8,07	67,27	1,21	8,15
	8	62,87	0,56	7,27	60,80	0,32	6,04	60,14	0,41	6,56	61,27	0,43	6,62
	9	65,55	0,90	8,31	64,02	0,69	6,97	63,44	0,78	7,59	64,33	0,79	7,63
	10	50,41	-0,31	3,60	53,44	-0,30	2,69	52,92	-0,30	3,04	52,26	-0,30	3,11
Asphalte	1	23,84	0,22	-0,47	28,57	0,99	-0,97	28,85	0,80	-0,89	27,09	0,67	-0,78
	2	42,88	1,12	4,64	42,76	1,10	2,87	41,94	1,11	3,08	42,53	1,11	3,53
	3	47,17	0,29	1,70	46,23	0,51	0,62	45,95	0,47	0,93	46,45	0,43	1,08
	4	66,91	5,12	24,99	66,23	4,02	21,84	65,61	4,58	22,57	66,25	4,57	23,13
	5	59,42	3,33	14,51	58,67	2,54	11,62	58,01	2,85	12,21	58,70	2,91	12,78
	6	65,67	3,33	13,81	62,98	2,69	12,16	62,41	3,00	12,79	63,68	3,01	12,92
Béton préfabriqué	1	57,36	-0,41	1,81	54,27	-0,19	0,88	53,87	-0,22	1,26	55,17	-0,27	1,32
	2	71,99	0,24	3,82	69,37	0,25	2,90	68,82	0,29	3,41	70,06	0,26	3,37
	3	60,95	-0,28	2,03	58,03	-0,10	1,09	57,54	-0,11	1,48	58,84	-0,16	1,53
	4	46,35	-0,34	-0,76	45,04	0,17	-1,33	44,56	0,04	-1,12	45,32	-0,05	-1,07
	5	71,58	0,09	1,87	69,46	0,14	1,15	68,97	0,15	1,58	70,00	0,13	1,53
	6	67,48	-0,06	2,63	64,37	-0,08	1,71	63,77	-0,08	2,14	65,21	-0,07	2,16
	7	41,40	-0,66	-2,62	40,07	0,03	-2,89	39,75	-0,14	-2,69	40,41	-0,26	-2,73

TABLEAU A.142 – Coordonnées colorimétriques mesurées pour les échantillons de revêtements à l'état initial.

Familie	N°	CM				CR1				CR2				Moyenne des 3			
		L_{moy}^*	a_{moy}^*	b_{moy}^*	L_{moy}^*	a_{moy}^*	b_{moy}^*	L_{moy}^*	a_{moy}^*	b_{moy}^*	L_{moy}^*	a_{moy}^*	b_{moy}^*	L_{moy}^*	a_{moy}^*	b_{moy}^*	
Béton bitumineux	1	30,24	0,84	4,43	31,80	1,04	2,59	32,73	1,09	3,28	31,59	0,99	3,43	31,59	0,99	3,43	
	2	37,78	1,54	6,56	37,50	1,42	4,59	41,48	1,47	5,80	38,92	1,48	5,65	38,92	1,48	5,65	
	3	56,37	1,60	9,60	55,03	1,26	8,13	54,26	1,78	9,74	55,22	1,55	9,16	55,22	1,55	9,16	
	4	56,05	3,54	15,30	54,39	2,42	12,88	53,42	2,82	13,27	54,62	2,93	13,82	54,62	2,93	13,82	
	5	53,18	3,40	14,48	52,69	2,52	12,38	52,45	2,85	12,85	52,77	2,92	13,24	52,77	2,92	13,24	
	6	55,94	3,75	15,17	55,62	2,56	12,81	55,05	2,96	13,17	55,54	3,09	13,72	55,54	3,09	13,72	
	7	54,85	3,34	14,16	55,65	2,43	12,16	58,30	2,19	11,13	56,27	2,65	12,48	56,27	2,65	12,48	
Béton de ciment	1	70,65	0,68	7,27	68,86	0,22	6,14	68,29	0,37	6,69	69,27	0,42	6,70	69,27	0,42	6,70	
	2	71,11	0,79	7,95	68,87	0,31	6,72	64,37	0,67	7,37	68,12	0,59	7,35	68,12	0,59	7,35	
	3	53,85	1,60	8,66	53,53	0,97	7,31	54,98	1,47	8,33	54,12	1,35	8,10	54,12	1,35	8,10	
	4	62,13	2,44	10,46	61,93	2,04	9,70	60,76	1,90	9,47	61,61	2,13	9,88	61,61	2,13	9,88	
	5	64,29	1,20	9,12	61,12	0,59	7,52	62,57	0,79	7,90	62,66	0,86	8,18	62,66	0,86	8,18	
	6	72,16	0,98	7,56	69,53	0,66	6,65	69,08	0,79	7,08	70,26	0,81	7,10	70,26	0,81	7,10	
	7	73,49	0,88	7,23	70,40	0,76	6,69	67,56	0,89	7,45	70,48	0,84	7,12	70,48	0,84	7,12	
	8	62,30	1,26	8,95	60,37	0,64	7,45	61,23	0,91	8,13	61,30	0,94	8,18	61,30	0,94	8,18	
	9	68,77	1,28	9,05	66,51	0,87	8,09	61,94	0,74	7,27	65,74	0,96	8,14	65,74	0,96	8,14	
	10	50,45	-0,06	4,10	52,10	-0,12	3,07	49,72	0,37	3,94	50,76	0,06	3,70	50,76	0,06	3,70	
Asphalte	1	45,11	1,85	6,93	44,02	1,76	5,28	45,50	1,70	5,48	44,88	1,77	5,90	44,88	1,77	5,90	
	2	53,29	1,33	5,75	52,09	1,21	4,63	52,35	1,24	4,92	52,58	1,26	5,10	52,58	1,26	5,10	
	3	57,83	1,01	5,30	55,33	0,89	4,05	58,40	1,18	5,82	57,19	1,03	5,06	57,19	1,03	5,06	
	4	72,38	1,92	10,85	70,30	1,46	9,22	68,56	1,68	9,30	70,41	1,69	9,79	70,41	1,69	9,79	
	5	66,35	1,92	8,72	65,03	1,51	7,10	64,43	1,65	7,41	65,27	1,69	7,74	65,27	1,69	7,74	
	6	68,46	1,66	7,77	65,83	1,37	6,55	63,54	1,13	5,93	65,94	1,39	6,75	65,94	1,39	6,75	
Béton préfabriqué	1	62,05	-0,15	3,44	58,77	-0,18	2,26	59,05	0,15	3,72	59,96	-0,06	3,14	59,96	-0,06	3,14	
	2	62,60	0,98	7,10	60,17	0,76	5,81	58,82	0,68	5,47	60,53	0,81	6,13	60,53	0,81	6,13	
	3	61,77	0,22	4,46	58,85	0,11	3,41	56,95	0,23	3,51	59,19	0,19	3,79	59,19	0,19	3,79	
	4	53,88	0,28	3,05	51,92	0,30	1,97	54,33	0,37	2,56	53,38	0,32	2,53	53,38	0,32	2,53	
	5	70,97	0,69	4,50	62,69	0,48	3,40	61,29	0,55	3,93	64,98	0,57	3,94	64,98	0,57	3,94	
	6	68,94	0,41	5,19	60,35	0,26	3,81	57,19	0,16	2,78	62,16	0,28	3,93	62,16	0,28	3,93	
	7	56,91	-0,97	-1,63	49,19	-0,34	-1,91	44,20	0,08	-0,60	50,10	-0,41	-1,38	50,10	-0,41	-1,38	

TABLEAU A.143 – Coordonnées colorimétriques mesurées pour les échantillons de revêtements vieilliss naturellement.

Famille	N°	Description des revêtements	$\Delta E_{ab}^*(T0/T30)$
Béton bitumineux	1	Béton bitumineux semi grenu BBSG 0/10 continu avec granulats foncés	6,86
	2	Béton bitumineux très mince BB 0/6 discontinu avec granulats clairs	13,79
	3	Béton bitumineux très mince BB 0/6 discontinu avec granulats clairs sablés	5,35
	4	Béton bitumineux très mince BB 0/6 discontinu avec granulats clairs	23,41
	5	Béton bitumineux très mince BBMA 0/10 discontinu avec granulats clairs	21,01
	6	Béton bitumineux semi grenu BBSG 0/10 continu avec granulats clairs et TiO ₂	9,03
	7	Béton bitumineux mince BBM 0/10 discontinu avec granulats clairs et TiO ₂	11,37
Béton de ciment	1	Béton 0/14 finition balayée granulats clairs	2,73
	2	Béton 0/14 finition lissée granulats clairs	5,72
	3	Béton 0/14 finition désactivé granulats foncés	1,07
	4	Béton 0/14 finition désactivé granulats clairs	2,96
	5	Béton 0/14 finition bouchardée granulats foncés	4,13
	6	Béton 0/14 finition bouchardée granulats clairs	7,34
	7	Béton 0/14 finition poncée granulats clairs	3,39
	8	Béton 0/14 finition sablée granulats foncés	1,63
	9	Béton 0/14 finition sablée granulats clairs	1,51
	10	Béton poreux 4/10	1,65
Asphalte	1	Asphalte type AT 0/6 avec granulats clairs finition brut	19,03
	2	Asphalte type AC2Gr 0/10 avec granulats clairs finition grenailé	10,17
	3	Asphalte type AC2Gr 0/10 avec granulats clairs finition poncé	11,47
	4	Asphalte type AT 0/6 avec granulats clairs finition brut et TiO ₂	14,27
	5	Asphalte type AC2Gr 0/10 avec granulats clairs finition grenailé et TiO ₂	8,37
	6	Asphalte type AC2Gr 0/10 avec granulats clairs finition poncé et TiO ₂	6,77
Béton préfabriqué	1	Béton préfabriqué brut gris	5,13
	2	Béton préfabriqué lavé gris	9,93
	3	Béton préfabriqué grenailé gris	2,31
	4	Béton préfabriqué vieilli gris	8,83
	5	Béton préfabriqué poreux gris foncé	5,59
	6	Béton préfabriqué flammé blanc	3,54
	7	Béton préfabriqué flammé noir	9,79

TABLEAU A.144 – Description détaillée des revêtements et différences de couleur entre les échantillons T0 et T30.

Titre : Simulation, évaluation et optimisation de la lisibilité nocturne des aménagements urbains : prise en compte des propriétés de réflexion de la lumière par les revêtements pour un éclairage adapté aux différents usagers de l'espace public.

Mot clés : Éclairage public, aménagement urbain, photométrie des revêtements, visibilité, réalité virtuelle.

Résumé : Aujourd'hui, l'adaptation des territoires au changement climatique est un sujet de plus en plus important et beaucoup de réflexions sont menées pour intégrer cet impératif à la ville et son aménagement. Dans ce contexte, la réduction des dépenses énergétiques associées à l'éclairage public est un moyen d'action privilégié pour lequel trois leviers peuvent être considérés. Le premier concerne les sources d'éclairage en remplaçant les sources énergivores par des technologies à LED moins consommatrices. Le second réside sur une meilleure prise en compte des propriétés optiques des surfaces routières pour concevoir les installations d'éclairage. Le troisième levier concerne les usagers et leurs spécificités d'observation selon leur mode de déplacement.

Les exigences de performance pour l'éclairage routier sont définies en considérant une géométrie qui correspond à un automobiliste circulant sur une route interurbaine à une vitesse comprise entre 70 et 90 km/h. Toutefois, la plupart de l'éclairage public est situé en zone urbaine, où la vitesse moyenne est comprise entre 30 et 50 km/h et où les usagers ne pas seulement des automobilistes, mais aussi des cyclistes et des piétons.

Ce projet de recherche propose de changer de paradigme sur la façon de concevoir un aménagement urbain nocturne en mettant les propriétés de réflexion de la lumière par les revêtements au cœur du dimensionnement d'installations d'éclairage urbain et en considérant mieux les différents usages de l'espace public en tenant compte des différences de

perception entre les usagers.

Pour cela, un moteur de calcul d'éclairage urbain permettant de faire varier les sources lumineuses, les revêtements routiers et l'angle d'observation a été mis au point. A partir de celui-ci, les critères de performances définis dans les standards peuvent être déterminés. Pour aller plus loin, un calcul de visibilité a été intégré au logiciel en suivant le modèle bien connu de niveau de visibilité d'Adrian (VL) pour les applications d'éclairage routier, modèle que nous avons adapté pour prendre en compte les réflexions de l'éclairage sur la chaussée.

Par ailleurs, nous avons mis en œuvre une expérimentation avec sujets en réalité virtuelle couplée à de l'eye-tracking pour savoir où les usagers regardent sur le sol lors de leurs déplacements. Elle nous a permis d'étudier l'influence de la modalité de déplacement (piéton, cycliste, automobiliste) sur l'angle d'observation moyen en milieu urbain nocturne. Des calculs d'éclairage et des mesures sur site ont ensuite été effectués en utilisant les angles d'observation moyens obtenus par type d'usagers pour différentes situations d'éclairage avec différents revêtements routiers. Cela nous a permis d'une part d'étudier l'influence de la surface de la route et de ses propriétés photométriques. D'autre part, ceci nous a servi à analyser si ces différences d'angle d'observation impliquent de revoir les standards actuels de dimensionnement de l'éclairage pour prendre en compte tous les usagers de la route et de l'espace urbain.

Title: Simulation, evaluation and optimisation of the night-time legibility of urban designs: taking into account the light reflection properties of pavements for lighting adapted to the different users of the public space.

Keywords: Public lighting, urban planning, pavement photometry, visibility, virtual reality.

Abstract: Today, adapting to climate change is an increasingly important issue, and much thought is being given to integrating this imperative into the city and its development. In this context, reducing the energy costs associated with public lighting is a key area for action, and three levers can be considered. The first concerns lighting sources, by replacing energy-guzzling sources with more energy-efficient LED technologies. The second involves taking better account of the optical properties of road surfaces when designing lighting installations. The third lever concerns users and their specific observation needs according to their mode of travel.

The performance requirements for road lighting are defined on the basis of a geometry that corresponds to a motorist travelling on an interurban road at a speed of between 70 and 90 km/h. However, most street lighting is located in urban areas, where the average speed is between 30 and 50 km/h and where users include not only motorists, but also cyclists and pedestrians.

This research project proposes a paradigm shift in the way night-time urban development is designed, by placing the light-reflecting properties of pavements at the heart of the design of urban lighting installations and by giving greater consideration to the different uses of public space, taking into account the

differences in perception between users.

To achieve this, an urban lighting calculation engine has been developed that allows light sources, road surfaces and observation angles to be varied. From this, the performance criteria defined in the standards can be determined. To go a step further, a visibility calculation has been integrated into the software using the well-known Adrian visibility level model (*VL*) for road lighting applications, which we have adapted to take account of lighting reflections on the road surface.

In addition, we carried out an experiment using virtual reality subjects coupled with eye-tracking to find out where users look on the ground as they move around. This enabled us to study the influence of the mode of travel (pedestrian, cyclist, motorist) on the average angle of observation in a night-time urban environment. Lighting calculations and on-site measurements were then carried out using the average observation angles obtained by type of user for different lighting situations with different road surfaces. This enabled us to study the influence of the road surface and its photometric properties. On the other hand, it enabled us to analyse whether these differences in observation angles mean that current lighting design standards need to be revised to take account of all road and urban space users.